РАДИОАКТИВНОСТЬ И РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В СРЕДЕ ОБИТАНИЯ ЧЕЛОВЕКА

МАТЕРИАЛЫ VI МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Том 1

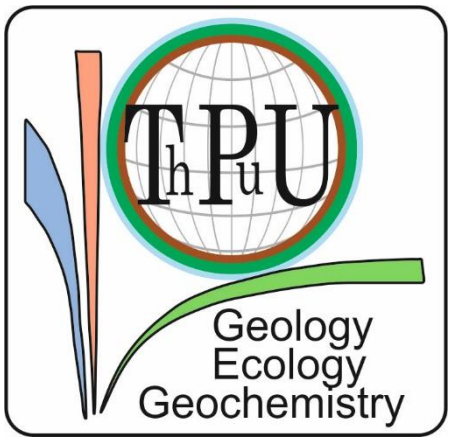
г. Томск, 20–24 сентября 2021 г.

РАДИОАКТИВНОСТЬ И РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В СРЕДЕ ОБИТАНИЯ ЧЕЛОВЕКА

RADIOACTIVITY AND RADIOACTIVE ELEMENTS IN ENVIRONMENT

ТОМ 1

National Research Tomsk Polytechnic University
Russian Academy of Sciences
Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS
All-Russian Scientific-research Institute of Mineral Resources named after N. M.Fedorovsky
Scientific Research Institute for Radiation Medicine and Ecology
of the non-commercial joint-stock company «Semey Medical University»
Université Paris-Saclay, France
Paris-Sorbonne University, France



RADIOACTIVITY AND RADIOACTIVE ELEMENTS IN ENVIRONMENT

PROCEEDINGS
OF VI INTERNATIONAL CONFERENCE

Volume 1

September 20–24, 2021

Tomsk 2021

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»
Российская академия наук
Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН
Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского
Научно-исследовательский институт радиационной медицины и экологии
Медицинского университета Семей Республика Казахстан
Университет Париж-Сакле, Франция
Университет Сорбона, Франция

РАДИОАКТИВНОСТЬ И РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В СРЕДЕ ОБИТАНИЯ ЧЕЛОВЕКА

МАТЕРИАЛЫ
VI МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Том 1

20–24 **сентября** 2021 **г**.

Томск 2021

УДК 539.16+577.346:574(063)
ББК 22.383+28.707.1л0
Р15

Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека : материалы VI Международной конференции (Томск, 20–24 сентября 2021 г.). В 2 томах. Том 1 / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – 671 с.

Р15

ISBN 978-5-4387-1026-4 (т. 1)
ISBN 978-5-4387-1025-7

В сборнике докладов конференции обсуждаются актуальные проблемы, связанные с явлением радиоактивности, распространением естественных и техногенных радионуклидов в различных природных средах. Приводятся данные по радиоэкологическому состоянию отдельных территорий, методам анализа радионуклидов. Освещаются вопросы влияния радиоактивности и радиоактивных элементов на биоту и человека, проблемы оценки дозовых нагрузок.

Сборник представляет интерес для геологов, геохимиков, биологов, медиков, экологов и других специалистов, интересующихся проблемами радиогеологии, радиогеохимии, радиоэкологии.

УДК 539.16+577.346:574(063)
ББК 22.383+28.707.1л0

Редакционная коллегия
Е. Г. Язиков, докт. геол.-мин. наук, профессор (главный редактор)
С. И. Арбузов, докт. геол.-мин. наук, профессор
Н. В. Барановская, докт. биол. наук, профессор
В. А. Домаренко, канд. геол.-мин. наук, профессор
А. А. Поцелуев, докт. геол.-мин. наук, профессор
О. Г. Савичев, докт. геогр. наук, профессор
Л. М. Болсуновская, канд. фил. Наук
Б. Р. Соктоев, канд. геол-мин наук,
В. В. Жуков, тех. секретарь

Editorial Board
E. G. Yazikov, Professor (Editor-in-Chief)
S. I. Arbuzov, Professor
N. V. Baranovskaya, Professor
V. A. Domarenko, PhD
A. A. Pozeluev, Professor
O. G. Savichev, Professor
L. M. Bolsunovskaya, PhD
B. R. Soktoev, PhD
V. V. Zhukov, Secretary

Рецензенты
А. М. Адам, докт. тех. наук, профессор
А. В. Мананков, докт. геол.-мин. наук, профессор
Н. Н. Ильинских, докт. биол. наук, профессор

Reviewers
A. M. Adam, Dr. tech. sci., professor
A. V. Manankov, Dr. geol.-mineral. sci., professor
N. N. Ilyinskikh, Dr. biol. sci., professor

ISBN 978-5-4387-1026-**4 (т. 1)**
ISBN 978-5-4387-1025-7

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2021
© Оформление. Отделение геологии ИШПР ТПУ, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ ..... 21 ..... INTRODUCTION

ИЗ ПЛЕНА ЛЕТ

Забытые страницы истории открытия радиоактивности
И. Г. Печенкин ..... 24 ..... Forgotten facts about the discovery history of the radioactivity *I. G. Pechenkin*

Этапы становления кафедры геологии и разведки руд редких и радиоактивных элементов и роль Л. П. Рихванова в открытии новых научных направлений
Е. Г. Язиков, В. А. Домаренко ..... 30 ..... The stages of formation of the department of geology and exploration of rare and radioactive elements ores and the role of L. P. Rikhvanov in the discovery of new scientific directions *E. G. Yazikov, V. A. Domarenko*

К 120-летию Юрия Александровича Билибина
Ю. Б. Миронов, А. М. Карпунин, В. З. Фукс ..... 33 ..... To the 120th anniversary of Yuri Alexandrovich Bilibin *Yu. B. Mironov, A. M. Karpunin, V. Z. Fuks*

О ренессансе геологической школы урановой геологии
А. А. Верчеба ..... 36 ..... About the renaissance of the geological school of uranium geology *A. A. Vercheba*

РАДИОАКТИВНОСТЬ И РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В СРЕДЕ ОБИТАНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Оценка содержания урана в питьевой воде: исследование в Павлодарской области, Казахстан
Ш. Ж. Арынова, Л. П. Рихванов, А. И. Беляновская ..... 42 ..... Assessing uranium concentration in drinking water: case-study in Pavlodar region, Kazakhstan *S. Z. Arynova, L. P. Rikhvanov, A. I. Belyanovskaya*

Radioactive potentiality of alkali feldspar granites of homret el gergab area, Eastern desert, Egypt
Mohamed Ghoneim, Maher Dawoud, Abdelhalim S. Mahmoud, Hanaa El-Dokouny,
..... 45 ..... *Aleksey V. Nastavkin*

Radioactive elements in coal and their possible impacts
..... 47 ..... *Robert B. Finkelman, Sergey Arbuzov*

Оценка экологической безопасности добычи урана методом СПВ с точки зрения возможности самоочищения подземных вод на примере Добровольного месторождения урана
Г. И. Авдонин, М. Д. Носков, Г. А. Тарханова, А. В. Сащенко ..... 49 ..... The environmental safety assessment of the in situ leaching uranium mining technology in terms of the ground water self-purification possibility on the example of Dobrovolnoye uranium deposit *G. I. Avdonin, M. D. Noskov, G. A. Tarkhanova, A. V. Sashchenko*

Современное радиоэкологическое состояние и механизмы радиоактивного загрязнения «Атомного озера» на Семипалатинском испытательном полигоне

М. Р. Актаев, А. О. Айдарханов, С. Б. Субботин, Т. Ш. Токтаганов 53

Current radioecological state and mechanisms of radioactive pollution of the «Atomic lake» on the territory of Semipalatinsk test site

M. R. Aktayev, A. O. Aidarkhanov, S. B. Subbotin, T. SH. Toktaganov

Радиоактивные элементы (U, Th) в углях Северной Азии

С. И. Арбузов, С. С. Ильенок, И. Ю. Чекрыжов 55

Radioactive elements (U, Th) in the coals of Northern Asia

S. I. Arbuzov, S. S. Ilenok, I. Yu. Chekryzhov

Опережающие аэрогеофизические исследования при проведении ГРР на уран и другие виды тпи, и направления развития современных аэрогеофизических технологий

П. С. Бабаянц, О. Р. Контарович, А. А. Трусов 63

Advanced airborne geophysical methods for uranium and other types of minerals exploration, developments of modern airborne surveys

P. S. Babayants, O. R. Kontarovich, A. A. Trusov

Аэрогеофизика на сверхлегких носителях при выполнении съемок высокого разрешения

П. С. Бабаянц, О. Р. Контарович, А. А. Трусов 65

Airborne geophysics on ultralight aircrafts and UAV for high-resolution surveys

P. S. Babayants, O. R. Kontarovich, A. A. Trusov

Естественная и техногенная радиоактивность почв в районе месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова

А. В. Баженов, Е. Ю. Яковлев, С. В. Дружинин 68

Radioactive isotopes in the soils in the area of the diamond deposit named after M. V. Lomonosov

A. V. Bazhenov, E. Y. Yakovlev, S. V. Dryzhinin

Геохимические особенности радиоактивных элементов в солевых отложениях питьевых вод Северного Казахстана

Г. Е. Байкенова, Н. В. Барановская, А. А. Какабаев, Р. И. Берсимбаев 72

Geochemical features of radioactive elements in salt sediments of drinking water in Northern Kazakhstan

G. E. Baikenova, N. V. Baranovskaya, A. A. Kakabayev, R. I. Bersimbaev

Миграция ^{137}Cs и ^{90}Sr в элементарных ландшафтно-геохимических системах Южного Урала

В. Ю. Берёзкин, Е. М. Коробова, В. С. Баранчуков, Д. И. Долгушин, О. В. Тарасов, С. Л. Романов, М. В. Модоров, Л. Н. Михайловская 76

Migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr in elementary landscape-geochemical systems of the Southern Urals

V. Yu. Berezkin, E. M. Korobova, V. S. Baranchukov, D. I. Dolgushin, O. V. Tarasov, S. L. Romanov, M. V. Modorov, L. N. Mikhailovskaya

Определение тория и урана в углях и угленосных породах методом ИСП-МС: опыт применения в ДВГИ ДВО РАН

М. Г. Блохин, Н. В. Зарубина, И. Ю. Чекрыжов 80

ICP-MS determination of torium and uranium in coals and coal-bearing rocks

M. G. Blokhin, N. V. Zarubina, I. Yu. Chekryzhov

Формы миграции урана в подземных водах на участке шламохранилища низкоуровневых РАО

А. Е. Богуславский, О. С. Шварцева, О. Гаськова, А. В. Сафонов 84

Forms of uranium migration in underground waters at the site of a low-level rw sludge storage facility

A. Boguslavskyi, O. Shvartseva, O. Gaskova, A. Safonov

Биомониторинг радиоактивного загрязнения реки Енисей

А. Я. Болсуновский, Д. В. Дементьев, Е. А. Трофимова, А. В. Зуева 88

Biomonitoring of radioactive contamination of the Yenisei river

A. Bolsunovsky, D. Dementyev, E. Trofimova, A. Zueva

Ранжирование территорий по стабильности радиационных показателей современной экологической обстановки
Ю. Ю. Брайт, А. В. Липихина, Н. В. Барановская . 94

Ranking of territories by stability of radiation indicators of modern environmental situation
Y. Y. Brait, A. V. Lipikhina, N. V.Baranovskaya

Анализ распределения урана и тория на территории г. Юрга по данным изучения снегового покрова
Ю. С. Будаева, А. В. Таловская, Е. Г. Язиков, Е. С. Торосян 97

Analysis of the distribution of uranium and thorium in the territory of Yurga according to the data of studying the snow cover
Y. S. Budaeva, A. V. Talovskaya, E. G. Yazikov, E. S. Torosyan

Радиоактивность городских и сельских поселений Ростовской области
Е. А. Бураева, Т. М. Минкина, А. В. Огиенко, Е. Ю. Антонова, И. С. Ревнивцев, К. А. Калашникова, О. В. Каменев, А. Е. Шадин, Т. А. Михайлова 101

Radioactivity of urban and rural settlements of the Rostov region
E. A. Buraeva, T. M. Minkina, A. V. Ogienko, E. Yu. Antonova, I. S. Revnivtsev, K. A. Kalashnikova, O. V. Kamenev, A. E. Shadin, T. A. Mikhaylovaa

Кадровый резерв геологоразведочного дивизиона ядерной отрасли
А. А. Верчеба, П. А. Игнатов, О. В. Каржева 106

Personnel reserve of the geological exploration department of nuclear industry
A. A. Vercheba, P. A. Ignatov, O. V. Karjeva

Уран и торий в природных водах Центрального Сихотэ-Алиня (Приморский край)
А. В. Ветошкина, И. Ю. Чекрыжов, А. М. Паничев, Е. А. Вах 109

Uranium and thorium in natural waters of the Central Sikhote-Alin (Primorsky territory)
A. V. Vetoshkina, I. Yu Chekryzhov, A. M. Panichev, E. A. Vakh

Радиоэкологические исследования на территории г. Большой камень в Приморском крае
А. В. Ветошкина 114

Radioecological research in the territory of the Bolshoi kamen in Primorsky krai
A. V. Vetoshkina

Радиоактивные элементы (U, Th) в снеговом покрове в районах расположения цементных заводов юга Западной Сибири
Д. А. Володина, А. В. Таловская, Е. Г. Язиков 118

Radioactive elements (U, Th) in the snow cover in the areas of location of cement plants in the south of Western Siberia
D. A. Volodina, A. V. Talovskaya, E. G. Yazikov

Характеристики метасоматитов вулкана Кудрявый (Курильские острова) в радиогеохимических полях
Т. В. Володькова 122

The characteristics of the metasomatites of Kudryavy volcano (Kuril islands) in the radiogeochemical fields
T. V. Volod'kova

Уран в диктионемовых сланцах прибалтийского бассейна (Ленинградская область)
В. И. Вялов, Т. А. Дю 127

Uranium in the dictyonema shale of the Baltic basin (Leningrad region)
V. I. Vyalov, T. A. Dyu

Нейтрализация радиоактивного воздействия золошлаковых отходов ТЭС путем встраивания их в структуру силикатов
Б. М. Гольцман, Е. А. Яценко, С. В. Трофимов 132

Neutralization of tpp ash-slag wastes radioactive effect by integrating them into the structure of silicates
B. M. Goltsman, E. A. Yatsenko, S. V. Trofimov

Анализ новых открытий месторождений урана типа «несогласия» впадины Атабаска (провинция Саскачеван, Канада)
Н. А. Гребенкин, М. А. Рогожина, А. К. Ржевская, И. Е. Чистякова 136

Analysis of new discoveries of unconformity-related uranium deposits in the Athabasca basin (Saskatchewan, Canada)
N. A. Grebenkin, M. A. Rogozhina, A. K. Rzhevskaya, I. E. Chistyakova

Перспективы урагоносности Коргонского прогиба Алтая
А. И. Гусев 139

Perspectives of uranium-bearing Korgon trough Altay
A. I. Gusev

Перспективы освоения комплексных золото-урановых месторождений Эльконского района
А. А. Данилов, И. Д. Гласс, Е. С. Овчарова, В. Ю. Фомин, А. А. Руденко, В. Г. Журавлев, В. А. Домаренко 143

Prospects for the development of aurum-uranium deposits in the Elkonsky district
A. A. Danilov, I. D. Glass, E. S. Ovcharova, V. Y. Fomin, A. A. Rudenko, V. G. Zuravlev, V. A. Domarenko

Перовскиты кочумдекского контактового ореола (Восточная Сибирь): первый опыт U-Pb датирования методом LA-ICP-MS
А. С. Девятиярова, В. С. Каменецкий, Э. В. Сокол, С. Н. Кох, Е. Н. Нигматулина 149

Perovskite from the kochumdek contact aureole in East Siberia: applicability to the LA-ICP-MS U-Pb geochronology (first experience)
A. S. Deviatiiarova, V. S. Kamenetsky, E. V. Sokol, S. N. Kokh, E. N. Nigmatulina

Ретроспективный анализ поступления техногенных радионуклидов в донные отложения р. Енисей
Д. В. Дементьев, А. Я. Болсуновский, В. И. Вахрушев, С. В. Косиненко 154

Retrospective analysis of the entrance of artificial radionuclides into bottom sediments of the Yenisei river
D. V. Dementyev, A. Ya. Bolsunovsky, V. I. Vakhrushev, S. V. Kosinenko

Перспективы выявления месторождений урана в обрамлении Западно-Сибирской плиты
А. П. Долгушин 159

Prospects for identifying uranium deposits framed by the West Siberian plate
A. P. Dolgushin

О новой концепции формирования и размещения уранового оруденения восточной окраины Западно-Сибирской плиты
В. А. Домаренко, Ю. Б. Миронов, Е. А. Воробьев 161

On a new concept of the formation and placement of uranium mineralization in the eastern margin of the West Siberian plate
V. A. Domarenko, Yu. B. Mironov, E. A. Vorobyov

Перспективы выявления комплексных золото-урановых месторождений на юге Центральной Сибири
В. А. Домаренко, Р. Ю. Гаврилов 167

Prospects for detecting complex gold-uranium deposits in the south of Central Siberia
V. A. Domarenko, R. Yu. Gavrilov

Оценка ресурсного потенциала комплексных железо-редкоземельных руд Бакчарского рудного узла на основе компьютерного моделирования (Томская область)
В. А. Домаренко, Б. К. Кенесбаев, Е. В. Перегудина 171

Assessment of the resource potential of complex iron-rare earth ores of the Bakchar ore node based on computer modeling (Tomsk region)
V. A. Domarenko, B. K. Kenesbayev, E. V. Peregudina

Геохимические особенности распределения урана и тория в подземных водах Семипалатинского испытательного полигона
Г. М. Есильканов, Е. Г. Язиков, Е. З. Шакенов, Н. Ж. Мухамедияров, М. Т. Дюсембаева, А. Ж. Ташекова, В. В. Колбин, А. Е. Темиржанова, А. О. Айдарханов 177

Geochemical features of uranium and thorium distribution in groundwater of the Semipalatinsk test site
G. M. Yessilkanov, E. G. Yazikov, Ye. Z. Shakenov, N. Zh. Mukhamediyarov, M. T. Dyussembayeva, A. Zh. Tashekova, V. V. Kolbin, A. Ye. Temirzhanova, A. O. Aidarkhanov

Уран-ториевая минерализация в графитовых рудах Ботогольского месторождения
С. М. Жмодик, Е. В. Айриянц, Д. К. Белянин, Э. О. Бабаяков, А. Г. Миронов, Т. Н. Мороз, В. А. Пономарчук, А. Н. Пыряев 179

Uranium and thorium mineralization in graphite ores of Botogol deposit
S. M. Zhmodik, E. V. Airiyants, D. K. Belyanin, E. O. Babayakov, A. G. Mironov, T. N. Moroz, V. A. Ponomarchuk, A. N. Pyryaev

Радиоактивные, редкие и благородные элементы в щелочных породах массива Богдо (Арктическая Сибирь)
С. М. Жмодик, Е. В. Лазарева, Д. К. Белянин, А. В. Толстов 184

Radioactive, rare and precious elements in the alkaline rocks of the Bogdo massif (Arctic Siberia)
S. M. Zhmodik, E. V. Lazareva, D. K. Belyanin, A. V. Tolstov

Оценка долговременной радиоэкологической опасности радионуклидов, входящих в состав жидких радиоактивных отходов, на примере пункта глубинного захоронения филиала «Северский» ФГУП «НО РАО»
Т. Ю. Заведий, О. Н. Кокорев 189

Evaluation of long-term radioecological hazard for radionuclides in liquid radioactive wastes on example of the deep disposal site in Seversk
T. Yu. Zavedy, O. N. Kokorev

Уран и торий в водах горнорудных объектов золоторудных месторождений Дарасунского рудного поля (Восточное Забайкалье)
Л. В. Замана, Л. В. Таскина, Ш. А. Аскаров 194

Uranium and thorium in the development objects waters of the gold-ore deposits of the Darasun ore field (Eastern Transbaikalia)
L. V. Zamana, L. V. Taskina, Sh. A. Askarov

Радиоактивные изотопы и тяжелые металлы в почвах Северодвинского промышленного района
Е. Н. Зыкова, Е. Ю. Яковлев, С. Б. Зыков 199

Radioactive isotopes and heavy metals in soils of the Severodvinsk industrial region
E. N. Zykova, E. Yu. Yakovlev, S. B. Zykov

Особенности долгосрочного плана по выводу из эксплуатации и ликвидации последствий на АЭС «Фукусима-дайити»
Р. Д. Ибораташоев 202

Features of the long-term plan for decommissioning and elimination of consequences at the Fukushima daiichi nuclear power plant
R. D. Iboratshoev

Организация мониторинга воздействия подземного скважинного выщелачивания на природные воды урановых месторождений Южного Казахстана
М. М. Искаков, С. К. Кайрамбаев, А. А. Урбисинова, Р. С. Жунусов, Р. Б. Беремжанов, Е. Н. Панова 207

Organization of monitoring of the impact of underground borehole leaching on natural waters of uranium deposits in South Kazakhstan
M. M. Iskakov, S. K. Kairambaev, A. A. Urbisinova, R. S. Zhunusov, R. B. Beremzhanov, E. N. Panova

Радиоэкологические исследования территорий, прилегающих к рудникам подземного скважинного выщелачивания урана АО «НАК Казатомпром»
М. М. Искаков, С. К. Кайрамбаев, Ю. Г. Перменев, О. А. Агапов, С. А. Сайдуллаева, К. А. Жапабаев 211

Radioecological research of the territories adjacent to underground uranium mines
M. M. Iskakov, S. K. Kairambaev, Yu. G. Permenev, O. A. Agapov, S. A. Saidullaeva, K. A. Zhapabaev

Электрохимическое осаждение радия-226 и его облучение нейтронным полем в реакторе типа ИРТ-Т с целью получения радия-223 — Electrochemical deposition of radium-226 and its irradiation by a neutron field in a reactor of the IRT-T type in order to obtain radium-223

А. Б. Капитонов, Н. Р. Неволин, В. В. Сохорева, С. А. Пластун, А. М. Большаков, М. С. Черепнёв, М. С. Кузнецов, А. С. Семенов, В. М. Малютин, В. В. Зукау, Д. В. Кабанов, Ф. А. Ворошилов, Е. А. Маренкова, И. В. Безденежных ..... 215 ..... *E. A. Marenkova, I. V. Bezdenezhnykh*

Применение гиперспектральных исследований с целью картирования урановосных гидротермалитов на месторождении Столбовое (Восточное Присаянье) — Application of hyperspectral studies for mapping of uranium hydrothermalites at the Stolbovoye field (Eastern Prisayanye)

Е. Н. Карманов, Н. В. Леденева ..... 216 ..... *E. N. Karmanov, N. V. Ledeneva*

Зональность, стадийность и особенности образования урановосных березитов по результатам специализированного картирования гидротермально-метасоматических образований на месторождение урана (на примере Южного Казахстана) — Zoning, stages and features of formation of uraniferous beresites resulting from a special-purpose mapping of hydrothermal-metasomatic alteration on uranium deposits (on the example of South Kazakhstan)

С. В. Кашин ..... 220 ..... *S. V. Kashin*

Уран и торий в лампрофирах Алтае-Саянской складчастой области — Uranium and thorium in lamprophyres of the Altai-Sayan folded region

Б. К. Кенесбаев ..... 224 ..... *B. K. Kenesbayev*

Металлогения радиоактивных элементов Дальневосточного региона России — Metallogeny of radioactive elements in the Russian far east

В. Е. Кириллов ..... 228 ..... *V. E. Kirillov*

Плейстоценовый эндогенный уран-полиэлементный рудогенез в окраинно-континентальной структуре Востока Азии — The pleistocene uranium-polyelement ore genesis in the continental margin structure of Eastern Asia

А. А. Коковкин ..... 233 ..... *A. A. Kokovkin*

Предложения по поискам и прогнозно-поисковым работам на уран на территории юга Дальнего Востока России — Suggestions on exploration and forecast-exploration works on uranium in the Russian far east south area

А. А. Коковкин ..... 238 ..... *A. A. Kokovkin*

Специфика плейстоцен-голоценового рудогенеза в мезозойско-кайнозойских рифтогенах юга Дальнего Востока России (ЮДВР) и проблемы прогнозно-поисковых работ на гидрогенный уран — Specifics of the pleistocene-holocene uranium ore genesis in the mesozoic-cenozoic riftogens of the Russian far east south and the problems of the forecast-exploration studies on hydrogenic uranium

А. А. Коковкин ..... 241 ..... *A. A. Kokovkin*

Позиция Репьевского месторождения урана в региональной зональности метасоматоза, пострудные перстройки и перспективы урановосности структуры Среднего Поволжья — Position of the Repyevskoe uranium deposit in the regional zone of metasomatism, postrude perstructions and prospects of the uranium range of the middle Volga structure abstract

А. А. Коковкин ..... 245 ..... *A. A. Kokovkin*

Геологическое изучение площадки российского пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (первый блин может быть комом) — Geological study of the site of the russian deposit of radioactive waste (The first step is always the hardest)
В. Н. Комлев ... 248 ... *V. N. Komlev*

К горно-геологическому обоснованию подземного объекта заключительной стадии ядерного топливного цикла — To mining and geological validation of the underground object of the final stage of the nuclear fuel cycle
В. Н. Комлев ... 255 ... *V. N. Komlev*

Сравнительный анализ уровней накопления техногенных радионуклидов в донных отложениях на различных участках Обь-Иртышской речной системы — Comparative analysis of accumulation levels of technogenic radionuclides in ground deposits on various sites of the Ob-Irtysh river system
А. В. Коржавин, В. Н. Трапезникова, В. Н. Николкин, А. В. Трапезников ... 265 ... *A. V. Korzhavin, V. N. Trapeznikova, V. N. Nikolkin, A. V. Trapeznikov*

Радиометрические методы исследований при геохимических поисках месторождений нефти и газа в Восточной Сибири — Radiometric research methods in geochemical prospecting for oil and gas fields in Eastern Siberia
Г. Л. Корюкин, О. В. Шапошников ... 269 ... *G. L. Koryukin, O. V. Shaposhnikov*

Радиоактивные и другие элементы в компонентах окружающей среды территории угольного месторождения прибайкалья — Radioactive and other elements in the environmental components of the territory of the coal deposit of the baikal region
П. В. Кузнецов, В. И. Гребенщикова ... 273 ... *P. V. Kuznetsov, V. I. Grebenshchikova*

Роль гамма-спектрометрии при решении задач геологического картирования и поисков твердых полезных ископаемых — The role of gavva-spectrometry in geological mapping and mineral exploration
Ф. Д. Лазарев, П. В. Кирплюк, А. Н. Онищенко, Р. А. Леденгский ... 277 ... *F. D. Lazarev, P. V. Kirpluk, A. N. Onischenko, R. A. Ledengskiy*

Распределение Th, U, Mo, Mn, Fe, Ni, Cu, As в донных отложениях солёного озера — Distribution of Th, U, Mo, Mn, Fe, Ni, Cu, As in the bottom sediments of the salt lake
Е. В. Лазарева, С. М. Жмодик, А. В. Брянская, Б. Ю. Сарыг-оол, И. С. Кириченко ... 284 ... *E. V. Lazareva, S. M. Zhmodik, A. V. Bryanskaya, B. Y. Sarug-ool, I. S. Kirichenko*

Комплексное освоение месторождений урана в Зауралье — Integrated development of uranium deposits in the Trans-Urals
Ю. И. Лаптев, А. В. Ладейщиков, А. С. Лавров ... 289 ... *Y. I. Laptev, A. V. Ladeyshchikov, A. S. Lavrov*

Радиогеохимическое картирование интрузивов по аэрогеофизическим данным — Radiogeochemical mapping of intrusives on airborne geophysical data
Р. А. Леденгский ... 294 ... *R. A. Ledengskiy*

Радиоизотопы в голоценовом разрезе Шерстобитовского верхового болота Барабинской лесостепи (юг Западной Сибири) — Radioisotopes in the holocene section of the Sherstobitovsky raised bog Barabinskaya forest-steppe (south Western Siberia)
Г. А. Леонова, М. С. Мельгунов, К. А. Мезина, Ю. И. Прейс, А. Е. Мальцев, В. А. Бобров ... 302 ... *G. A. Leonova, M. S. Melgunov, K. A. Mezina, Yu. I. Preis, A. E. Maltsev, V. A. Bobrov*

Варьирование удельной активности естественных радионуклидов в диагностических горизонтах дерново-подзолистых почв — Variation of specific activity of natural radionuclides In diagnostic horizons sod-podzolic soils
Д. Н. Липатов, Д. В. Манахов, С. В. Мамихин ..... 307 ..... *D. N. Lipatov, D. V. Manakhov, S. V. Mamikhin*

Применение фторидов для переработки ОЯТ энергетических реакторов — Application of fluorides for reprocessing SNF from power reactors
Д. С. Лобков, В. А. Карелин, А. В. Малин ..... 311 ..... *D. S. Lobkov, V. A. Karelin, A. V. Malin*

Результаты радиоэкологических исследований в 30-км зоне снятой с эксплуатации Игналинской АЭС — Results of radioecological's investigations in 30-km zone of the decommissioned Ignalina NPP
Й. Мажейка, О. Ефанова, Р. Петрошюс ..... 316 ..... *J. Mazeika, O. Jefanova, R. Petrosius*

Актиноиды Th и U во взвешенных веществах приземной атмосферы Якутска — Actinoids Th and U in suspended matters of the surface atmosphere of Yakutsk
В. Н. Макаров ..... 320 ..... *V. N. Makarov*

Особенности геологии, металлогении и перспективы Тонодского поднятия (Северное Забайкалье) — Features of geology, metallogeny and prospects of Tonodsky elevation (Northern Transbaikalia)
Л. Б. Макарьев, В. А. Калина ..... 325 ..... *L. B. Makariev, V. A. Kalina*

Оценка процессов перераспределения изотопов урана в минеральных фазах алевролитов методами частичной экстракции — Estimation of the processes of uranium isotopes redistribution in mineral phases of siltstones by the methods of partial extraction
А. И. Малов, С. Б. Зыков, А. С. Тышов ..... 331 ..... *A. I. Malov, S. B. Zykov, A. S. Tyshov*

Радиоэкологическая оценка органоминеральных донных отложений озёр Обь-Чулымского междуречья (Васюганье) — Radioecological assessment of lacustrine organomineral bottom sediments of the Ob-Chulym interfluve (Vasiugan)
Г. И. Малов, В. Д. Страховенко, Е. А. Овдина ..... 335 ..... *G. I. Malov, V. D. Strahovenko, E. A. Ovdina*

Отработка угольных месторождений с повышенным содержанием естественных радионуклидов, как фактор влияния на радиационно-экологическое состояние региона (на примере Забайкальского края) — Mining of coal deposits with a high content of natural radionuclides as a factor of influence on the radiation-ecological state of the region (on the example of the Transbaikal territory)
П. М. Маниковский ..... 340 ..... *P. M. Manikovsky*

Разработка методики контроля радиофармпрепаратов — Development of a method for control of radiopharmaceuticals
Е. А. Маренкова, М. С. Кузнецов, Н. Р. Неволин, В. В. Сохорева, С. А. Пластун, А. М. Большаков, М. С. Черепнёв, А. С. Семенов, В. М. Малютин, В. В. Зукау, Д. В. Кабанов, Ф. А. Ворошилов, А. Б. Капитонов, И. В. Безденежных ..... 345 ..... *E. A. Marenkova, M. S. Kuznetsov, N. R. Nevolin, V. V. Sokhorev, S. A. Plastun, A. M. Bolshakov, M. S. Cherepnev, A. S. Semenov, V. M. Malyutin, V. V. Zukau, D. V. Kabanov, F. A. Voroshilov, A. B. Kapitonov, I. V. Bezdenezhnykh*

Минерально-сырьевой потенциал урана — Uranium mineral and raw potential
Г. А. Машковцев, А. В. Бойцов, С. В. Полонянкина, А. В. Тарханов ..... 347 ..... *G. A. Mashkovtsev, A. V. Boytsov, S. V. Polonyankina, A. V. Tarkhanov*

Радионуклиды в природных водах западных районов Тургайского прогиба — Radionuclides in the natural waters of western regions of Turan trough
Н. А. Медешова, Д. А. Новиков, А. А. Максимова, А. С. Деркачев ..... 350 ..... *N. A. Medeshova, D. A. Novikov, A. A. Maksimova, A. S. Derkachev*

ЭПР-спектрометрия гамма-облученного сахара
И. М. Меджидов, О. В. Тхорик, В. А. Харламов, Т. В. Чиж, И. В. Полякова 354

EPR spectrometry of gamma-irradiated sugar
I. M. Medzhidov, O. V. Tkhorik, V. A. Kharlamov, T. V. Chizh, I. V. Polyakova

Геохимические особенности и их роль в оценке и освоении пластово-инфильтрационных урановых месторождений Шу-Сарысуйской и Сырдарьинской провинций Казахстана
А. А. Мендыгалиев, Е. Г. Язиков, Я. К. Аршамов .. 358

Geochemical features and their role in the assessment and development of the roll-front uranium deposits in the Shu-Sarysuy and Syrdarya provinces of Kazakhstan
A. A. Mendygaliyev, E. G. Yazikov, Y. K. Arshamov

Опыт применения в РФ метода КНД-М при разведке и отработке месторождений урана скважинным подземным выщелачиванием
А. Р. Миносьянц, А. А. Новгородцев, Е. А. Гурулев, Ю. И. Лаптев 361

Experience of using the KND-M method in the Russian Federation for exploration and development of uranium deposits Borehole underground leaching
A. R. Minosyants, E. A. Gurulev, Y. I. Laptev

Основные направления развития региональных геологоразведочных работ на уран на территории РФ
Ю. Б. Миронов, А. А. Пуговкин 366

Main directions of development of regional geological exploration works on uranium in the territory Of the Russian Federation
Yu. B. Mironov, A. A. Pugovkin

Радиоэкологическая обстановка в Забайкальском крае
Л. А. Михайлова, Б. В. Нимаева, С. Э. Лапа 370

Radioecological situation in the trans-baikal territory
L. A. Mikhailova, B. V. Nimaeva, S. E. Lapa

Многолетние результаты радиоэкологического мониторинга зоны влияния жидких сбросов Белоярской атомной электростанции
Л. Н. Михайловская, А. В. Коржавин, В. Н. Трапезникова, А. В. Трапезников 373

Results of long-term radioecological monitoring Of the effect zone of liquid discharges from the Beloyarsk nuclear power plant
L. N. Mikhailovskaya, A. V. Korzhavin, V. N. Trapeznikova, A. V. Trapeznikov

Радиоактивные элементы в компонентах природной среды золоторудного месторождения Вьюн (республика Саха-(Якутия))
А. Ю. Мишанькин, Е. Г. Язиков, Е. А. Филимоненко, Ю. П. Собянин 377

Radioactive elements in the components of the natural environment of the vyun gold ore deposit (republic of Sakha-(Yakutia))
A. Yu. Mishankin, E. G. Yazikov, E. A. Filimonenko, Yu. P. Sobyanin

Углеродные сорбенты в обеспечении радиационной безопасности
В. М. Мухин, М. А. Гутникова 382

Carbon sorbents in ensuring radiation safety
V. M. Mukhin, M. A. Gutnikova

Распределение урана и тория в природных и техногенных водах (на примере объектов Западной и Восточной Сибири)
И. Н. Мягкая, Б. Ю. Сарыг-оол, И. С. Кириченко, В. И. Малов, М. А. Густайтис, Е. В. Лазарева 385

Uranium and thorium distribution in natural and man-made waters (objects of West and East Siberia)
I. N. Myagkaya, B. Yu. Saryg-ool, I. S. Kirichenko, V. I. Malov, M. A. Gustaitis, E. V. Lazareva

Альтернативные методы получения радиофармакологического изотопа Ra^{223}
Н. Р. Неволин, В. В. Сохорева, С. А. Пластун, А. М. Большаков, М. С. Черепнёв, М. С. Кузнецов, А. С. Семенов, В. М. Малютин, В. В. Зукау, Д. В. Кабанов, Ф. А. Ворошилов, Е. А. Маренкова, А. Б. Капитонов, И. В. Безденежных 390

Alternative methods for obtaining the radiopharmacological isotope Ra^{223}
N. R. Nevolin, V. V. Sokhorev, S. A. Plastun, A. M. Bolshakov, M. S. Cherepnev, M. S. Kuznetsov, A. S. Semenov, V. M. Malyutin, V. V. Zukau, D. V. Kabanov, F. A. Voroshilov, E. A. Marenkova, A. B. Kapitonov, I. V. Bezdenezhnykh

LREE, MREE, HREE, U и Th – ключевые компоненты редкоземельных руд различных генетических типов
А. В. Некипелова, Э. В. Сокол, С. Н. Кох ..... 392 ..... *A. V. Nekipelova, E. V. Sokol, S. N. Kokh*

LREE, MREE, HREE, U, and Th as a key components of the diverse rare earth ores

Перспективы выявления месторождений урана в мезо-кайнозойских отложениях Амуро-Зейской депрессии
А. А. Новгородцев, Ю. Б. Миронов ..... 398 ..... *A. A. Novgorodtsev, Y. B. Mironov*

Prospects for detecting uranium deposits in the meso-cenozoic sediments of the Amuro-Zeyskaya depression

Природа радиоактивности минеральных вод Крымского полуострова
Д. А. Новиков, Т. В. Корнеева, А. А. Хващевская, М. С. Мельгунов, Н. Г. Сидорина, А. А. Коханенко, А. В. Черных, А. А. Максимова, Ф. Ф. Дульцев, А. С. Деркачев ..... 402 ..... *D. A. Novikov, T. V. Korneeva, A. A. Khvaschevskaya, M. S. Melgunov, N. G. Sidorina, A. A. Kokhanenko, A. V. Chernykh, A. A. Maksimova, F. F. Dultsev, A. S. Derkachev*

Nature of radioactivity of the mineral waters of the Crimean peninsula

Радионуклидный состав природных вод Новосибирской городской агломерации
Д. А. Новиков, А. С. Деркачев, А. А. Максимова, Ф. Ф. Дульцев, А. А. Хващевская, А. Ф. Сухорукова, А. В. Черных ..... 408 ..... *D. A. Novikov, A. S. Derkachev, A. A. Maksimova, F. F. Dultsev, A. A. Khvashchevskaya, A. F. Sukhorukova, A. V. Chernykh*

Radionuclides composition of the natural waters in the Novosibirsk area

Первые данные по распределению урана и тория в подземных водах нефтегазоносных отложений арктического сектора Западной Сибири
Д. А. Новиков, Ю. Г. Копылова, Ф. Ф. Дульцев, Л. Г. Вакуленко, А. А. Максимова, А. А. Хващевская, П. А. Ян, А. В. Черных ..... 413 ..... *D. A. Novikov, Yu. G. Kopylova, F. F. Dultsev, L. G. Valulenko, A. A. Maksimova, A. A. Khvashchevskaya, P. A. Yan, A. V. Chernykh*

The first data on the uranium and thorium distribution in the groundwaters of the oil-gas-bearing deposits in the arctic part of West Siberia

Торий-урановая типизация радоновых вод юга Сибири
Д. А. Новиков, Ю. Г. Копылова, А. А. Хващевская, А. А. Максимова, А. С. Деркачев, Ф. Ф. Дульцев, А. В. Черных ..... 418 ..... *D. A. Novikov, Yu. G. Kopylova, A. A. Khvaschevskaya, A. A. Maksimova, A. S. Derkachev, F. F. Dultsev, A. V. Chernykh*

Thorium-uranium typification of radon-rich waters in the south of west Siberia

Геохимические признаки аномальной верхней мантии кратонов
А. Д. Ножкин, Г. М. Вовна ..... 423 ..... *A. D. Nozhkin, G. M. Vovna*

Geochemical features of the anomalous upper mantle of cratons

Th/U отношение в донных отложениях малых озёр юга Западной Сибири
Е. А. Овдина, В. Д. Страховенко, Г. И. Малов ..... 426 ..... *E. A. Ovdina, V. D. Strakhovenko, G. I. Malov*

Th/U ratio in bottom sediments of small lakes (south of Western Siberia)

Радиоизотопные методы при поисках месторождений урана
Т. М. Овсянникова, Н. А. Гребенкин, Д. А. Прохоров, А. В. Стародубов, Д. М. Машнин, И. С. Тубольцев ..... 430 ..... *T. M. Ovsyannikova, N. A. Grebenkin, D. A. Prokhorov, A. V. Starodubov, D. M. Mashnin, I. S. Tuboltsev*

Radioisotopic methods in exploration of uranium deposits

Решение прикладных геологических и геоэкологических задач с помощью радиоизотопных методов
Т. М. Овсянникова, А. Е. Бахур, А. В. Стародубов, Д. А. Прохоров ..... 435 ..... *T. M. Ovsyannikova, A. E. Bakhur, A. V. Starodubov, D. A. Prokhorov*

Radioisotopic methods in applied issues of geology and geoecology

История, результаты и проблемы геологического изучения Енисейского участка для захоронения радиоактивных отходов
А. Ю. Озерский, Е. Г. Полякова ..... 443 ..... *Andrey Ozerskiy, Elena Polyakova*

History, results, and problems of the geological investigation of the Yenisseyskiy site for radio-active waste disposal

К вопросу обоснования границ области исследований геологической среды при создании и эксплуатации подземной исследовательской лаборатории в Красноярском крае
Д. А. Озерский, В. С. Гупало, К. С. Казаков, Г. Д. Неуважаев ..... 448 ..... *Dmitrii Ozerskii, Vladimir Gupalo, Konstantin Kazakov, Georgii Neuvazhaev*

Regarding the issue of geological environment investigation area boundaries determination at the construction and operation stages of underground research laboratory in Krasnoyarski krai

Оценка влияния эксплуатации БН-800 на радиационную обстановку в сельском хозяйстве в районе Белоярской АЭС
А. В. Панов, А. В. Трапезников, В. К. Кузнецов, А. В. Коржавин, Н. Н. Исамов, И. В. Гешель ..... 452 ..... *A. V. Panov, A. V. Trapeznikov, V. K. Kuznetsov, A. V. Korzhavin, N. N. Isamov, I. V. Geshel*

Assessment of the influence of BN-800 operation on radiation situation in agriculture in the area of Beloyarsk NPP

Исследование радиационного воздействия последствий добычи урана на территорию месторождений «Северный Карамурун» и «Южный Карамурун»
Е. Н. Панова, П. А. Блынский, Е. О. Тлеукенов, В. Л. Ленкевич, А. К. Торебеков, Х. Р. Амагов, Д. С. Курманаев ..... 456 ..... *E. N. Panova, P. A. Blynskiy, E. O. Tleukenov, V. L. Lenkevich, A. K. Torebekov, Kh. R. Amagov, D. S. Kurmanaev*

Study of radiation effects of uranium mining on the territory of «North Karamurun» and «South Karamurun» deposits

Скрининг накопления ^{137}Cs в почвах и растительности радиоактивно загрязненных районов Тульской области
Т. А. Парамонова, О. Л. Комиссарова, Л. А. Турыкин, Н. В. Кузьменкова ..... 460 ..... *T. A. Paramonova, O. L. Komissarova, L. A. Turykin, N. V. Kuzmenkova*

Screening of Cs-137 accumulation in soils and vegetation on the territory of the plavsky radioactive hotspot, Tula region

Вулкано-плутонические комплексы и минеральные системы месторождений стратегических металлов Приаргунья
В. А. Петров, О. В. Андреева, В. В. Полуэктов, Д. В. Коваленко ..... 464 ..... *V. A. Petrov, O. V. Andreeva, V. V. Poluektov, D. V. Kovalenko*

Volcano-plutonic complexes and mineral systems of strategic metal deposits in Priargun region

Оценка чувствительности модели миграции радионуклидов из пункта приповерхностного захоронения радиоактивных отходов, используемой для прогнозных расчетов радиационного воздействия на человека
А. В. Понизов, А. С. Мишагина, Д. В. Мурлис ..... 471 ..... *A. V. Ponizov, A. S. Mishagina, D.V. Murlis*

Sensitivity assessment of a simulation model of radionuclides release from a near surface radioactive waste disposal fasility used for predictive calculations of radiation exposure on human

Совершенствование подходов к оценке долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов
А. В. Понизов, К. А. Лебедкин, П. М. Верещагин . 476 ..... *A. V. Ponizov, K. A. Lebedkin, P. M. Vereshchagin*

Improvement of approaches to assessment of long-term safety of deep disposal facilities for liquid radioactive waste

Радиогеохимическая специализация по K и Th – индикатор при аэрогеофических поисках месторождений
А. М. Портнов ..... 481 ..... *A. M. Portnov*

Radiogeochemical specialization in K and Th-an indicator for aerogeophical prospecting of deposits

Урановые и редкометалльные месторождения Сибири в материалах космических съемок
А. А. Поцелуев, Ю. С. Ананьев, В. Г. Житков, А. А. Новгородцев, Е. А. Митрофанов 486

Uranium and rare metal deposits of Siberia in the space imagery data
A. A. Potseluev, Y. S. Ananyev, V. G. Zhitkov, A. A. Novgorodtsev, E. A. Mitrofanov

Накопление радиоактивных элементов (U, Th) в многослойной залежи олиготрофного болота (южная тайга Западной Сибири)
Ю. И. Прейс, Л. П. Рихванов, А. Е. Мальцев 491

Accumulation of radioactive elements (U, Th) in the multilaer peat deposit of the raised bog (southern taiga of Western Siberia)
Yu. I. Preis, L. P. Rikhvanov, A. E. Maltsev

Радоноопасность арктических территорий: современное состояние изученности и перспективы развития тематики
А. В. Пучков, Е. Ю. Яковлев, N. Hasson, Ю. В. Цыкарева, А. С. Тышов, П. С. Лапиков, Е. В. Ушакова 496

Radon hazard of the arctic territories: current state of study and prospects for the development of research area
A. V. Puchkov, E. Yu. Yakovlev, Nicholas Hasson, Y. V. Tsykareva, A. S. Tyshov, P. I. Lapikov, E. V. Ushakova

Экспериментальные исследования и численный анализ процессов атмосферных выносов урана с территорий хвостохранилищ
В. Ф. Рапута, Д. В. Юсупов, Т. В. Ярославцева, Л. А. Дорохова 499

Experimental studies and numerical analysis of atmospheric processes of uranium removal from tailings
V. F. Raputa, D. V. Yusupov, T. V. Yaroslavtseva, L. A. Dorokhova

Основные итоги изучения прошлого радиоактивного загрязнения республики Алтай
Ю. В. Робертус 504

Radiogeochemical specialization in K and Th – the main results of the study of the past radioactive contamination of the Altai republic
Yu. V. Robertus

Формы нахождения актинидов и ^{137}Cs в двух промышленных водоемах ПО «Маяк»
А. К. Рожкова, Н. В. Кузьменкова 508

Actinides and ^{137}Cs association with bottom sediment components from two Mayak production association industrial reservoirs
A. K. Rozhkova, N. V. Kuzmenkova

U и Th в отходах обогащения сульфидных руд Комсомольского месторождения золота
Б. Ю. Сарыг-оол, И. Н. Мягкая, Е. В. Лазарева 513

U and Th in the sulfide tailings of Komsomolsk gold deposit
B. Yu. Saryg-ool, I. N. Myagkaya, E. V. Lazareva

Современные накопления урана в почвенно-торфяных отложениях Витимо-Каренгского района (Северное Забайкалье)
А. В. Сащенко, В. М. Тюленева 517

Modern uranium accumulations in soil-peat sediments of Vitimo-Karengsky district (Northern Transbaikal)
A. V. Sashchenko, V. M. Tyleneva

Методические подходы исследования радиоуглерода в почвах Семипалатинского испытательного полигона
З. Б. Сержанова, А. М. Раимканова, О. Н. Ляхова, А. К. Айдарханова 522

Methodological approaches for radiocarbon research in soils of Semipalatinsk test site
Z. B. Serzhanova, A. M. Raimkanova, O. N. Lyakhova, A. K. Aidarkhanova

Методы выделения Am, Pu, U, Tc из больших объемов морской и пресной воды
А. М. Сибирцев, О. А. Ширабон, А. К. Рожкова, Н. В. Кузьменкова 527

Methods for the extraction of Am, Pu, U, Tc from large volumes of sea and fresh water
A. M. Sibirtsev, O. A. Shirabon, A. K. Rozhkova, N. V. Kuzmenkova

Радиоэкологическая обстановка на территории в южной Якутии
П. И. Собакин, А. П. Чевычелов, А. Н. Горохов..... 531

Radioecological situation in the territory of southern Yakutia
P. I. Sobakin, A. P. Chevychelov, A. N. Gorokhov

Анализ фоновой и аномальной составляющих радиогеохимического поля при гамма-спектрометрических поисках месторождений полезных ископаемых
И. С. Соболев, К. А. Орехов, А. Н. Орехов..... 536

Background and anomaly components analysis of the radioactive spatial patterns in gamma-spectrometric exploration for mineral resources
I. S. Sobolev, K. A. Orekhov, A. N. Orekhov

Естественные радионуклиды и радиоцезий в взвеси и донных отложениях Онежского озера
В. Д. Страховенко..... 541

Natural radionuclides and radiocesium in the suspension and bottom sediments of lake Onego
V. D. Strakhovenko

Естественный радиационный фон территории Челябинского городского бора
А. А. Сутягин..... 547

Natural radiation background of the territory of Chelyabinsk city bor
A. A. Sutyagin

Оценка объемов урана и тория, выносимого дренажными водами при разработке гранитного карьера «Борок» (г. Новосибирск)
А. Ф. Сухорукова, Д. А. Новиков, А. А. Черкасов, А. С. Деркачев, А. А. Максимова..... 550

Evaluation of the amounts of uranium and thorium carried out with drainage waters during the development of the Borok granite quarry (Novosibirsk)
A. F. Sukhorukova, D. A. Novikov, A. A. Cherkasov, A. S. Derkachev, A. A. Maksimova

Радиогеохимические особенности аэрозольных выпадений в районах размещения предприятий теплоэнергетики (юг Западной Сибири)
А. В. Таловская, Е. Г. Язиков, В. В. Литау, Т. Е. Адильбаева, Е. С. Торосян, Н. А. Осипова 555

Radiochemical specific of aerosols in the areas impacted with thermal power plants (the south of Western Siberia)
A. V. Talovskaya, E. G. Yazikov, V. V. Litay, T. E. Adilbaeva, E. C. Torosyan, N. A. Osipova

Сезонная динамика тяжелых металлов и естественных радионуклидов в аэрозолях воздуха (PM-10, PM-2.5) малых населенных пунктов
А. Е. Темиржанова, Е. Г. Язиков, М. Т. Дюсембаева, Е. З. Шакенов, Г. М. Есильканов, Н. Ж. Мухамедияров, А. Ж. Ташекова, В. В. Колбин..... 561

Seasonal dynamics of heavy metals and naturally occurring radionuclides in air aerosols (PM-10, PM-2.5) of samll settlements
A. Ye. Temirzhanova, Ye. G. Yazikov, M. T. Dyusembayeva, Ye. Z. Shakenov, G. M. Yesilkanov, N. Zh. Mukhamediyarov, A. Zh. Tashekova, V. V. Kolbin

Особенности распределения естественных радионуклидов уран-238, торий-232 и радий-226 в приземном воздухе при сухом осаждении аэрозолей
М. П. Тентюков..... 564

Characteristics of natural radionuclides distribution such as uranium-238, thorium-232 and radium 226 in surface air during dry deposition of aerosols
M. P. Tentyukov

Изменение состояния продуктивного горизонта в области двухскважинного опыта ПВ-89 на Добровольном месторождении урана: наблюдения и моделирование
Т. С. Теровская, Г. И. Авдонин, А. Г. Кеслер, Ю. И. Лаптев, М. Д. Носков..... 568

Change of the productive horizon state in the area of two-well experiment PV-89 at the Dobrovolnoe uranium deposit: observations and modeling
T. S. Terovskaya, G. I. Avdonin, A. G. Kesler, U. I. Laptev, M. D. Noskov

Оценка влияния гидрогеохимических параметров на миграцию урана и тория в природных водах на основе факторного анализа
А. С. Торопов ..... 573 ..... *A. S. Toropov*

Отношение изотопов урана в поверхностных и подземных водах зон формирования стока горных рек как естественный индикатор их генезиса
Т. В. Тузова ..... 576 ..... *T. V. Tuzova*

Исследования содержания естественных и искусственных радионуклидов в воздухе степной зоны республики Казахстан
Д. В. Турченко, М. А. Умаров, А. А. Круглыхин ..... 581 ..... *D. V. Turchenko, M. A. Umarov, A. A. Kruglykhin*

О некоторых геологических факторах, влияющих на характер распределения тория в седиментационных бассейнах юрского возраста Западно-Сибирской плиты
В. В. Турышев, П. О. Бородина ..... 583 ..... *V. V. Turyshev, P. O. Borodina*

Применение метода электронного парамагнитного резонанса для качественной оценки свободных радикалов, образовавшихся в результате обработки ионизирующим излучением сушеного укропа
О. В. Тхорик, И. М. Меджидов, В. А. Харламов, И. В. Полякова, Т. В. Чиж, А. Ю. Шестериков, В. И. Шишко ..... 587 ..... *O. V. Tkhorik, I. M. Medzhidov, V. A. Kharlamov, I. V. Polyakova, T. V. Chizh, A. Yu. Shesterikov, V. I. Shishko*

Разработка программного обеспечения для расчёта доз внутреннего облучения с использованием биокинетических моделей
А. А. Харченко, А. Н. Шатров, Ф. Ф. Жамалдинов, А. О. Айдарханов ..... 591 ..... *A. A. Kharchenko, A. N. Shatrov, F. F. Zhamaldinov, A. O. Aidarkhanov*

Миграция ^{238}U в мерзлотных почвах техногенных ландшафтов Южной Якутии
А. П. Чевычелов, П. И. Собакин ..... 595 ..... *A. P. Chevychelov, P. I. Sobakin*

Уран и торий в углях кайнозойских впадин Приморья
И. Ю. Чекрыжов, Н. Ю. Попов, С. И. Арбузов ..... 600 ..... *I. Yu. Chekryzhov, N. Yu. Popov, S. I. Arbuzov*

Радиоактивность Баженовской свиты Западной Сибири и ее деформационно-прочностные характеристики
Н. Ф. Чистякова, М. Д. Субботин ..... 605 ..... *N. F. Chistyakova, M. D. Subbotin*

Подвижность ^{137}Cs в аллювиальных отложениях реки Енисей (ближняя зона влияния Красноярского ГХК)
А. В. Чугуевский, М. С. Мельгунов, И. В. Макарова ..... 608 ..... *A. V. Chuguevsky, M. S. Melgunov, I. V. Makarova*

Assessment of hydrogeochemical parameters on migration uranium and thorium in natural waters based on factor analysis

Uraniums isotopic composition in the surface and underground waters of the zones mountain rivers formation flow as a natural indicator of their genesis

Research of the content of natural and artificial radionuclides in the air of the steppe zone of the republic of Kazakhstan

On some geological factors affecting the distribution of thorium in the sedimentation basins of the jurassic age of the West Siberian plate

Application of the method of electronic paramagnetic resonance for the qualitative assessment of free radicals formed from treatment with ionizing radiation of dried dill

Developemnt of software to calcualte internal exposure doses using biokinetic models

Migration of ^{238}U in permafrost soils of technogenic landscapes of Southern Yakutia

Uranium and thorium in the coals of the cainozoic basins of Primorye

Radioactivity of the Bazhenov formation of Western Siberia and its deformation and strength characteristics

Mobility of ^{137}Cs in alluvial sediments of the Yenisei river (near zone of influence of the Krasnoyarsk MCC)

Радиоактивные песчаники в разрезе мела Лодочного месторождения — Radioactive sandstones in cretaceous strata of Lodochnoe oilfield
М. В. Шалдыбин, Е. Н. Ефимов ... 613 ... *M. V. Shaldybin, E. N. Efimov*

Оценка содержания урана и тория в накипи питьевых вод на территории Южного Казахстана — Assessment of the content of uranium and thorium in the scale of drinking water in the territory of Southern Kazakhstan
Б. У. Шарипова, А. А. Какабаев, Н. В. Барановская, Г. Е. Байкенова ... 617 ... *B. U. Sharipova, A. A. Kakabayev, N. V. Baranovskaya, G. E. Baikenova*

Pb-210 и Cs-137 в донных осадках малых озёр севера европейской части России — Pb-210 and Cs-137 in the bottom sediments of small lakes in the northern european part of Russia
В. П. Шевченко, Р. А. Алиев, Н. М. Кокрятская, Д. П. Стародымова, Д. А. Субетто, А. В. Травкина, А. В. Чупаков ... 621 ... *V. P. Shevchenko, R. A. Aliev, N. M. Kokryatskaya, D. P. Starodymova, D. A. Subetto, A. V. Travkina, A. V. Chupakov*

Уран и торий в отложениях Укурейской свиты Оловской впадины Забайкалья, вмещающих ископаемые остатки птицетазовых динозавров нового рода *Kulindadromeus Zabaikalicus* — Uranium and thorium in sediments of the Ukureiskaya formation of the Olovskaya depression in transbaikalia, which contain fossil remains of the new genus *Kulindadromeus Zabaikalicus* avian dinosaurs
Г. А. Юргенсон, Е. А. Василенко ... 626 ... *G. A. Yurgenson, E. A. Vasilenko*

Подготовка и переподготовка кадров с использованием ресурсного потенциала международного научно-образовательного центра «урановая геология» Томского политехнического университета — Training and retraining of personnel using the resource potential of the international scientific and educational center "uranium geology" of Tomsk polytechnic university
Е. Г. Язиков, С. И. Арбузов ... 630 ... *E. G. Yazikov, S. I. Arbusov*

Радиоактивные элементы в компонентах природной среды и отходах угле- и горнодобывающих предприятий Хакасии — Radioactive elements in the components of natural environment and in the waste of coal and mining enterprises of Khakassia
Е. Г. Язиков, С. В. Азарова ... 632 ... *E. G. Yazikov, S. V. Azarova*

Оценка влияния добычи алмазов на радиоэкологическое состояние экосистем арктической зоны (на примере Архангельской области, Россия) — Evaluation of the impact of diamond mining on the radio-ecological state of the arctic zone ecosystems (example of Arkhangelsk region, Russia)
Е. Ю. Яковлев, А. И. Малов, С. В. Дружинин, С. Б. Зыков, А. С. Орлов ... 637 ... *E. Yu. Yakovlev, A. I. Malov, S. V. Druzhinin, S. B. Zykov, A. S. Orlov*

Оценка уровня продуцирования радона в районах развития кимберлитового магматизма (на примере Архангельской алмазоносной провинции) — Assessment of the radon production rate in areas of development of kimberlite magmatism (on the example of Arkhangelsk diamond province)
Е. Ю. Яковлев, А. В. Пучков ... 641 ... *E. Yu. Yakovlev, A. V. Puchkov*

Современное радиоэкологическое состояние устьевой части реки Печора — The current radioecological state of the mouth of the pechor River
Е. Ю. Яковлев, А. В. Пучков ... 645 ... *E.Yu. Yakovlev, A. V. Puchkov*

Радиологическая характеристика водных ресурсов Кольского полуострова — Radiological characteristics of water resources of the Kola peninsula
Е. Ю. Яковлев, С. В. Дружинин, А. С. Дружинина, С. Б. Зыков ... 649 ... *E. Yu. Yakovlev, S. V. Druzhinin, A. S. Druzhinina, S. B. Zykov*

Накопление и миграция радионуклидов атмосферных выпадений в торфяно-болотных экосистемах европейской субарктики России
Е. Ю. Яковлев, А. А. Очеретенко, С. В. Дружинин, А. С. Дружинина, Р. К. Спиров, Е. В. Мищенко, Е. В. Жуковская ..... 654 ..... *E. U. Yakovlev, A. A. Ocheretenko, S. V. Druzhinin, A. S. Druzhinina, R. K. Spirov, E. V. Mishchenko, E. V. Zhukovskaya*

Accumulation and migration of radionuclides of atmospheric depositsin the peat-bog ecosystems of the European subarctic of Russia

Сравнительная оценка содержаний радиоактивных элементов в аэрозольных выпадениях на территории города Томска и обсерватории «Фоновая»
В. С. Бучельников, Е. Г. Язиков, М. П. Тентюков, А. В. Таловская ..... 658 ..... *V. S. Buchelnikov, E. G. Yazikov, M. P. Tentuikov, A. V. Talovskaya*

Comparison of radioactive elements' abundance in aerosol precipitations in Tomsk and "Fonovaya" observatory

Уран и торий в бурых углях Дальнего Востока
В. И. Вялов, А. В. Наставкин, Е. П. Шишов ..... 661 ..... *V. I. Vyalov, A. V. Nastavkin, E. P. Shishov*

Uranium and thorium in brown coal of the far east of Russia

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ..... *667* ..... AUTHOR INDEX

ПРЕДИСЛОВИЕ

INTRODUCTION

2021 год включает много знаменательных дат, в том числе это год 125-летия открытия гражданином Франции Анри Беккерелем явления радиоактивности, 125-летия утверждения российским императором Николаем II решения Государственного Совета об учреждении Томского практического технологического института (ТТИ), ныне Национального исследовательского Томского политехнического университета (ТПУ), ставшего первым высшим техническим учебным заведением на обширном пространстве России – от Волги до Тихого океана, 120-летия геологического образования в Сибири и 65-летия со дня выпуска первых геологов-уранщиков в Томском политехническом университете.

Открытие явления радиоактивности и носителей этого явления – радиоактивных элементов, изменило ход естествознания и дало человечеству источник энергии небывалой силы. «С надеждой и опасением, – писал великий русский ученый В. И. Вернадский в 1910 г. – всматриваемся мы в нового союзника и защитника». И он, как мы видим сейчас, через столетия, был абсолютно прав.

Открытие ТПИ дало толчок необычайному интеллектуальному и социально-экономическому развитию Сибири, да и всему государству Российскому. Наконец-то сбылась мечта многих общественных деятелей Сибири, утверждавших, что Сибирь, 330 лет сиднем сидевшая на своих богатствах, парализованная невежеством, инертностью, познавшая себя, несомненно, проявит всю мощь своих дремлющих сил в строительстве своей жизни и духовной, и материальной» (из речи П. И. Макушина на открытии Института исследования Сибири, 1918 г.). Трудно назвать то или иное направление развития науки и техники в нашей стране, к которому не были бы причастны сотрудники и выпускники ТПУ – приемника ТТИ.

За 125-летнюю историю вуз подготовил более 170 тысяч специалистов, среди которых более 50 Героев Социалистического Труда, 30 лауреатов Ленинской премии, свыше 300 лауреатов Государственных премий СССР и Российской Федерации, более 80 действительных членов и членов-корреспондентов государственных академий наук СССР, союзных республик, России и стран СНГ, более 450 первооткрывателей месторождений полезных ископаемых.

Несмотря на то, что Париж и Томск разделяют многие тысячи километров, между этими двумя событиями: открытием явления радиоактивности и открытием ТТИ, есть несомненная связь. Достаточно сказать, что в ознаменование 100-летия со дня открытия явления радиоактивности, именно в ТПУ была проведена I Международная конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», положившая начало целой серии конференций. В 2021 году мы проводим уже шестую конференцию по обозначенной выше тематике.

Имеющие архивные материалы позволяют утверждать, что в Томске с самого начала исследований явления радиоактивности ими занимались не менее активно, чем в Москве, Санкт-Петербурге и Одессе. К пионерам исследований радиоактивности и радиоактивных элементов в Сибири можно отнести ректоров вузов Томска Н. А. Гезехуса, Н. И. Карташова, профессоров ТТИ и ТГУ П. П. Орлова, В. С. Титова, Д. В. Алексеева, П. П. Пилипенко, П. П. Гудкова, М. Н. Соболева, В.А. Обручева и других.

Вторая волна исследований в этой области науки связана с открытием в Томске Сибирского физико-технического института (СФТИ), программа работы которого определялась с участием будущего руководителя «атомного проекта» страны И.В. Курчатова. В этот период времени проблемами радиоактивности занимались профессора П. С. Тартаковский, М. И. Корсунский, Д. Д. Иваненко, В. Д. Кузнецов, В. П. Чехов, М. П. Орлова и др. В стенах СФТИ начинал свою научную деятельность будущий легендарный ректор Томского политехнического института (ТПИ) А. А. Воробьев.

Свое наибольшее развитие в Томске научные исследования по ядерной тематике получили в послевоенный период. Строительство Сибирского химического комбината, открытие Физико-технического факультета ТПИ для подготовки кадров для комбината и ядерного комплекса страны: физиков-реакторщиков, химиков-технологов, геологов-уранщиков и др., создание при ТПИ НИИ ядерной физики, строительство исследовательского ядерного реактора, синхротрона «Сириус», серии циклотронов, бетатронов и других ядерно-физических установок – это все звенья одной цепи, связанной с исследованием радиоактивности.

ВУЗы Томска и, прежде всего ТПИ, стали кузницей кадров для атомной отрасли. Много ученых и специалистов в Томске и его городе-спутнике Северске (ранее Томск-7) занимались и занимаются проблемами, связанными с ядерной энергетикой, ядерными технологиями, радиоактивностью и радиоактивными элементами. Именно здесь, в Томске, 67 лет назад (приказ от 29.09.1954 г.) была начата подготовка специалистов в области геологии, поисков и разведки руд редких и радиоактивных элементов, а 65 лет назад произошел первый выпуск этих специа-

листов, которые своим трудом обеспечили создание минерально-сырьевой базы урана в России, Казахстане, Узбекистане.

Стремительное время закрывает одни направления работы и открывает другие. Но по-прежнему, как и во времена В. И. Вернадского, актуальным остается вопрос о том, станет ли «лучистая энергия» силой для защиты и для борьбы с поражающим нас несчастьями» (Вернадский, 1914).

В материалах конференции публикуются доклады участников из более чем 8 стран мира и десятков городов и научных центров Российской Федерации. В них рассматриваются самые различные вопросы: от геохимии и геологии уранового сырья до технологии извлечения, а также радиоактивные элементы в биологических объектах.

Анализируя списки участников предыдущих пяти конференций, становится очевидным, что уходят люди, стоявшие у истоков ядерной программы страны, меняются руководители министерств, производств, но вопросы и нерешенные острые проблемы остаются, причем, многие из них уже, как говорится, «с бородой». Это особенно хорошо видно на примере резолюции первой Всесоюзной конференции по радиоактивности, которая состоялась в Ленинграде в октябре 1932 года. Спустя 89 лет мы говорим практически о тех же проблемах: сырьевой базе, технологиях переработки и получения материалов, влиянии и минимизации воздействия на живые организмы, подготовка кадров. Но сегодня, в XXI веке, мы вправе ожидать от предстоящих дискуссий новых, прорывных идей и предложений, качественно иного разговора о наиболее эффективных путях использования мирного атома в энергетике, промышленном производстве, транспорте, медицине, других сферах жизнедеятельности человека. Атом, как и Вселенная – неисчерпаемы для поиска и познания, человечество всегда будет стремиться сужать границы неведомого, пытаясь понять, как устроен мир и какую пользу можно извлечь из новых знаний. Явление радиоактивности, открытое всего сто двадцать пять лет назад, на самом деле лишь небольшой луч света, пробивающийся через приоткрытую дверь. То мы увидим, если эту дверь распахнуть во всю ширь? С какими новыми вызовами и проблемами столкнемся? Как сделать так, чтобы нынешние и будущие открытия, разработки, технологии в атомной области человечество использовала во благо, а не во вред себе? Все эти вопросы, совсем не праздные, мы надеемся, будут всесторонне обсуждены на VI Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». И пусть не все ответы будут найдены сразу, важно знать, куда и зачем мы идем, чего хотим. Радиоактивность – процесс распада атомных ядер. Мы должны, вопреки лексическому значению слова «распад», направить этот процесс в сторону «сборки» умов, объединения и взаимообмена лучших прогрессивных идей, теорий, практического опыта для обеспечения безопасного мира и устойчивого развития нашей цивилизации.

Материалы предисловия с некоторыми дополнениями использованы из предыдущей конференции, которые были подготовлены Л. П. Рихвановым. Все отраженное в предисловии предыдущей конференции остается актуальным и в настоящее время.

Заместитель Председателя организационного комитета VI Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», профессор Национального исследовательского Томского политехнического университета, доктор геолого-минералогических наук, Е. Г. Язиков

Члены оргкомитета

ИЗ ПЛЕНА ЛЕТ

ЗАБЫТЫЕ СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ ОТКРЫТИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ

И. Г. Печенкин

Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского
Москва, Россия, pechenkin@vims-geo.ru

FORGOTTEN FACTS ABOUT THE DISCOVERY HISTORY OF THE RADIOACTIVITY

I. G. Pechenkin

All-Russian Scienific-Research Institute of Mineral resources named after N. M. Fedorovsky
Moscow, Russia, pechenkin@vims-geo.ru

It believed that the 1903 Nobel Prize in physics was deservedly award to Henri Becquerel, who «accidentally» discovered previously unknown rays and to the Curies, who selflessly paved the way systematically for future generations of researchers of the secrets of radioactivity. Almost 40 years earlier, Niepce de Saint-Victor described a more correct understanding of the process, ahead of time. Studying various substances to obtain a stable photographic emulsion, he immediately decided that the effect of uranium salts on a photographic plate caused by invisible radiation of matter, not associated with their fluorescence. Nowadays, many give priority in the discovery of radioactivity to Niepce de Saint-Victor.

В декабре 1903 г. Шведская королевская академия наук присудила Нобелевскую премию по физике разделив ее между Анри Беккерелем (Antoine Henri Becquerel) и супругами Кюри. А. Беккерель был особо упомянут в знак признания его выдающихся заслуг, выразившихся в открытии самопроизвольной радиоактивности. Новый вид проникающих лучей, испускаемых без внешнего облучения источника, стал известен как лучи Беккереля. Пьеру Кюри (Pierre Curie) и Марии Склодовской-Кюри (Maria Skłodowska-Curie) половина премии присуждалась в знак признания выдающихся заслуг, которые они оказали своими совместными исследованиями явлений, открытых профессором А. Беккерелем (рис. 1). Мари Кюри стала первой женщиной, удостоенной Нобелевской премии. Вторую премию (1911, по химии) она получила за выдающиеся заслуги в развитии химии: открытие элементов радия и полония, выделение радия и изучение природы и соединений этого элемента. Кюри – стала первой дважды лауреатом Нобелевской премии [2, 12].

Антуан Анри Беккерель (1852–1908) сотрудник Политехнической школы в Париже, исследуя недавно открытые рентгеновские лучи в 1896 г. случайно установил, что соли урана подвергаясь воздействию света, спонтанно испускают проникающее излучение, которое можно зарегистрировать на фотопластинке. Дальнейшие исследования показали, что это излучение было чем-то новым, а не рентгеновским.

Открытие Анри Беккереля вдохновило Марию (1867–1934) и Пьера Кюри (1859–1906) сотрудников Муниципальной школы промышленной физики и химии на дальнейшие исследования этого феномена. Они исследовали многие вещества и минералы на предмет признаков радиоактивности и обнаружили, что минеральная смоляная обманка более радиоактивна, чем уран. Стало ясно, что она должна содержать другие радиоактивные вещества. Им удалось извлечь два ранее неизвестных элемента – полоний и радий [12].

В исходном списке кандидатур лауреатов по физике фигурировали только Пьер Кюри и Анри Беккерель. Густав Миттаг-Леффлер (Magnus Gustaf

Рис. 1. Лауреаты Нобелевской премии 1903 г. по физике. Слева направо: Анри Беккерель, Пьер Кюри, Мария Саломея Склодовская-Кюри

Mittag-Leffler) – влиятельный член Шведской академии – сообщил об этом Пьеру. Тот незамедлительно ответил: «Мне бы хотелось, чтобы мои труды в области исследования радиоактивных тел рассматривали вместе с деятельностью госпожи Кюри. Действительно, именно ее работа определила открытие новых веществ, и ее вклад в это открытие огромен». Интересы супругов Кюри как исследователей слились настолько, что даже в своих лабораторных записях они употребляли местоимение «мы».

Несколько ранее – в 1896 г. научное сообщество после доклада А. Беккереля не видело весомых причин интересоваться его работой о лучах неясной природы [8], и он приостановил исследования в этом направлении. В этой ситуации Пьер и Мария Кюри приступили в 1897 г. к исследованиям невидимых лучей. Уже в первые месяцы 1898 г. Мария Кюри и на два месяца раньше нее Герхард Карл Шмидт (Gerhard Carl Schmid) (1865–1949) в Германии обнаруживают, что ториевые соединения также испускают лучи, подобные урановым. В июле 1898 г. Пьер и Мария Кюри сообщают о выделении из урановой руды нового химического элемента – полония, а в декабре в соавторстве с химиком Густавом Бемоном (Gustave Bémont) (1837–1957) доложили об открытии радия и впервые ввели термин «радиоактивность». С этого времени научный интерес к исследованиям радиоактивности стал постоянно возрастать, так как ученые увидели в радиоактивных веществах новый источник энергии небывалой мощности [1, 14].

Рис. 2. Клод Феликс Абель Ньепс де Сен-Виктор

Вернулся к изучению радиоактивных свойств солей урана и Анри Беккерель. Но был ли он первооткрывателем этого феномена? Еще в 1858 г., за 38 лет его открытия, французский офицер Клод Феликс Абель Ньепс де Сен-Виктор (рис. 2) обнаружил эти свойства соединений урана, т. е. впервые наблюдал явления радиоактивности [9, 11].

Клод Феликс Абель Ньепс де Сен-Виктор (Claude Félix Abel Niépce de Saint-Victor) (1805–1870) приходился двоюродным братом Жозефу Нисефору Ньепсу (Joseph Nicéphore Niépce) (1765–1833), французскому ученому-любителю, который вместе с Луи Дагером (Louis Jacques Mandé Daguerre) (1789–1851) считается родоначальником фотографии. Он родился в Сен-Сире и ему была уготована, по семейной традиции, карьера военного. Он посещал школу кавалерии в Сомюре и в 1842 г. стал лейтенантом драгунов в Монтобане. В этот же год он предложил оригинальный метод окраски тканей, который оценил Мишель-Эжен Шеврёль (Michel Eugène Chevreul) (1786–1889), директор Национальной мануфактуры гобеленов. Шеврёль интересовался фотографией, а тем более работами Ньепса де Сен-Виктора о разработке новых фотографических процессов и эмульсий. Ньепс считается первым, кто использовал белок в фотографиях и впервые создал негативы на стекле и стальных пластинках [6].

В 1845 г. он был переведен в Парижскую муниципальную гвардию, размещенную в казармах Святого Мартина, где оборудовал химическую лабораторию. Фотография – это взаимодействие химических веществ со светом, и мы можем быть уверены, что Ньепс исследовал десятки, если не сотни, вариаций веществ в течение следующего десятилетия. В 1848 г. во время февральской революции в пожаре погибает его лаборатория. В том же году он стал капи-

Рис. 3. Мишель Эжен Шеврёль

таном своего полка и кавалером Ордена Почетного легиона. Его премируют двумя тысячами франков от Общества развития национальной промышленности.

Когда он был назначен комендантом Лувра, у него появилось время для продолжения экспериментов и именно в этот период он проводит опыты с солями урана. После восшествия на трон Наполеона III, он вышел в отставку и продолжил свои исследования в области научной фотографии. Затем Ньепс де Сен Виктор работает в качестве ученого в лаборатории Александра Эдмонда Беккереля (Alexandre-Edmond Becquerel) на кафедре физики Консерватории искусств и ремесел. Все эти годы его работы поддерживал Мишель-Эжен Шеврёль (рис. 3) [6, 7].

С исторической точки зрения работу Ньепс де Сен-Виктора следует рассматривать как важнейшую, представившую первые результаты в области «фотографии невидимого» еще в 1857 г. Первая статья 1857 г. показывает, что открытие не произошло случайно [9], а публикация 1861 г. доказывала – он осознал природу явления, заключив, что оно не связано с флуоресценцией и фосфоресценцией [10]. В течение девяти лет Ниепс де Сен-Виктор бился над объяснением открытого им явления. Несмотря на то, что уровень развития физики и химии был недостаточен для понимания природы радиоактивности, часть его выводов оказалась более правильной, чем первоначальные объяснения Анри Беккереля. В противоположность ему Ньепс де Сен-Виктор сразу решил, что действие солей урана на фотопластинку вызывается невидимыми излучениями материи, не связанными с флуоресценцией солей урана [5, 9].

Научный куратор Ньепса Мишель Эжен Шеврёль признал это явление фундаментальным открытием («une découverte capitale»), указав, что соли урана сохраняют свою способность экспонировать фотопластинки даже после шести месяцев в темноте. К 1861 г. Ньепс прямо сообщил, что соли урана испускают своего рода излучение, невидимое для человеческого глаза: «… эта постоянная активность … не может быть связана с фосфоресценцией, поскольку она не могла бы длиться так долго, согласно экспериментам г-на Эдмона Беккереля; поэтому более вероятно, что это невидимое излучение …» [5, 11].

Рис. 4. Александр Эдмон Беккерель

Первое сообщение Ньепса появилось в отчете о заседании Академии наук еще 16 ноября 1857 г., но одновременно была добавлена первая заметка Эдмона Беккереля (Alexandre-Edmond Becquerel) (1820–1891) (рис. 4). В обзорах Академии наук сообщается, что эти материалы были добавлены в протокол в последнюю минуту благодаря вмешательству отца Эдмона – Антуана-Сезара Беккереля (Antoine César Becquerel) (1788–1878). Так, в La Lumière: Revue de la Photography от 17 ноября можно прочитать: «В конце сеанса г-н Беккерель объявил, что его сын г-н Эдмон Беккерель намерен зачитать информацию о различных свойствах и действиях света; работа, которая, с нескольких точек зрения, имеет отношение к работе г-на Ньепса» [7].

Очевидно, что существовала если не конкуренция, то по крайней мере живое соперничество между Ньепсом де Сен-Виктором, представленным Шеврёлем и Эдмоном Беккерелем, поддерживаемым его отцом. 24 мая 1858 г. Эдмон Беккерель представил в Академии наук вторую заметку, в которой через семь месяцев после Ньепса де Сен-Виктора он написал о «соединениях урана». Эта хронология предполагает (без доказательства), что Эдмон Беккерель интересовался этим, оставаясь при своем мнении о ведущей роли фосфоресценции и флуоресценции соединений урана, несмотря на полученные Ньепсом де Сен-Виктором результаты. Отчетливо видно, что семья Беккерелей пытается бороться за приоритет в получении результатов новых, пока еще не вполне понятных процессах.

Легко представить, что происходило в уме Анри Беккереля, когда в 1895 г., через три года после того, как он занял кресло своего отца в Музее естественной истории, он прочитал статью Уильяма Конрада Рентгена (Wilhelm Conrad Röntgen) (1845–1923) об открытии рентгеновских лучей. Он, как и его отец, предположил, что некоторые вещества, под воздействием световых лучей, могут также испускать невидимое излучение.

Следует отметить, что Беккерель в последующей части этой драмы не преуспел. Вскоре после того, как он в 1896 г. объявил Академии «о невидимом излучении, испускаемом солями урана» [8], несколько уважаемых ученых отметили, что такое же открытие с тем же минералом и практически теми же методами было сделано сорок лет назад и опубликовано в том же журнале. Несмотря на это, Беккерель в течение семи лет отказывался упоминать о своем предшественнике. Когда он, наконец, в 1903 г. сделал это,

то только для того, чтобы показать ошибочность работ Ньепса. Он писал: «Уран содержится на бумаге в таких небольших количествах, что для того, чтобы оказать заметное влияние на [фотографические] пластинки, используемые автором, необходимо было держать их рядом несколько месяцев. Поэтому Ньепс не мог наблюдать лучей урана». Что еще хуже, Беккерель переписал историю своих исследований. Делая первый доклад в Академии он, как и Ньепс до него, первоначально сообщил, что открыл своего рода lumière noire, который может отражаться, поляризоваться и преломляться так же, как и обычный свет.

Самым жестким критиком Беккереля, одним из тех, кто указывал на приоритет Ньепса в этом вопросе, был врач и социолог Гюстав Ле Бон (Gustave Le Bon) (1841–1931) (рис. 5). Фактически именно эксперименты Ле Бона в 1896–1899 годах показали, что новые лучи не обладают свойствами света, но идентичны катодным лучам, то есть электронам. Это означало, что первые эксперименты Беккереля, вероятно, были ошибочными [4]. Беккерель сам пришел к этой же точке зрения к 1899 г., не признавая претензии Ле Бона, а сторонники Беккереля продолжали утверждать, что он сразу показал, что урановые лучи не отражаются и не преломляются.

Помимо всего этого остается вопрос: знал ли Анри Беккерель о работе Ньепса или «забыл» о ней?

Все это не стало играть никакой роли, когда в 1903 г. была поставлена точка после получения Анри Беккерелем Нобелевской премии, которая вручается за открытия, а не всегда за их понимание и объяснение. Отметим, что ссылка на предшественника не повредила бы Анри Беккерелю, ибо к моменту присуждения Нобелевской премии Ньепс умер, а по статусу Нобелевская премия посмертно не присуждается. После получения премии Беккерель перестал отвечать своим критикам.

Если история Абеля Ньепса де Сен-Виктора чему-то нас учит, так это тому, что историю науки следует отделить от истории Нобелевской премии. Возможно, справедливость в конечном счёте будет восстановлена. В последние годы Абель Ньепс де Сен-Виктор похоже стал признанным первооткрывателем радиоактивности во Франции и в ряде других стран [5, 7, 13 и др.].

Не менее драматична история открытия полония и радия.

Богуслав Браунер (Bohuslav Brauner) (1855–1935) (рис. 6) один из самых известных чешских химиков, 19 августа 1896 г. получил письмо от сэра Уильяма Рамзая (William Ramsay) (1852–1916). В нем была просьба о приобретении образцов элиазита для дальнейшего изучения возможностей открытия новых благородных газов. Браунер с юности работал с рудами Рудных гор, а позже стал минералогом. Он отправил Рамзаю образцы урановой руды из шахты Сент-Элиас вблизи Иоахимсталя, который постепенно выделил из элиазита все благородные газы.

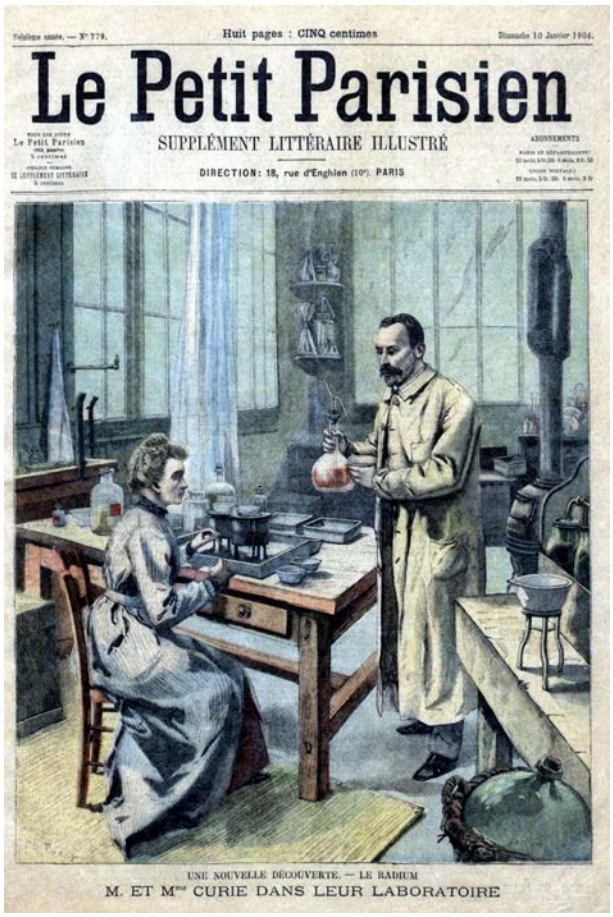
В том же году Браунер обнаружил, что минерал из Швеции – церит и чешский элиазит распространя-

Рис. 5. Гюстав Ле Бон

Рис. 6. Богуслав Браунер

ют необычное излучение. Так что Анри Беккерель и Богуслав Браунер экспериментировали с урановыми минералами одновременно. Разница заключалась в том, что Браунер ничего об этом не публиковал, т. к. его научный интерес был гораздо шире – экспериментальное изучение редких элементов в целом [3].

В 1897 г. Браунер подал запрос в Министерство образования в Вене на выделение около 5000 кг урановой руды Иоахимсталя, а также разрешения на аренду мастерской и наем трех-четырех рабочих. Он обосновал свой запрос тем, что спектральным анализом и аналитическими методами установил новый элемент в этой урановой руде и связанное с ним неизвестное излучение. Он измерил его высокую интенсивность и намеревался назвать новый элемент «Austrium» в честь Австрии. Правительство высоко ценило Браунера как исследователя – первого химика в стране, но не как гражданина. Дело в том, что Карлов университет, где трудился Браунер, в 1882 г., был разделен на чешский и немецкий (Университет Карла-Фердинанда). Ряд преподавателей, и Браунер в их числе, был не согласен с передачей отдельных зданий и лабораторий в ведение нового учебного заведения, т. к. им стало негде читать лекции и проводить эксперименты. Кроме того, чехи, окончившие


Huit pages : CINQ centimes

Le Petit Parisien

SUPPLÉMENT LITTÉRAIRE ILLUSTRÉ

DIRECTION: 18, rue d'Enghien (10e). PARIS

UNE NOUVELLE DÉCOUVERTE. — LE RADIUM

M. ET Mme CURIE DANS LEUR LABORATOIRE

Рис. 7. Супруги Кюри в их лаборатории. Обложка журнала «Le Petit Parisien». № 779 от 10 января 1904 г.

чешский университет, могли поступить на государственную службу только со свободным знанием немецкого языка. В итоге министерство решительно отклонило запрос Браунера [3].

Отказ не сильно на него повлиял. Он спокойно продолжил эксперименты со своими любимыми редкоземельными элементами. Для него была важна окончательная классификация 14 редких земель в периодической таблице элементов. Еще будучи студентом, Браунер стал горячим сторонником Д. И. Менделеева. С 1881 г. между Браунером и Менделеевым шла оживленная переписка, а в 1883–1901 гг. они трижды встречались. Д. И. Менделеев высоко ценил Браунера как ученого и считал его «одним из истинных укрепителей периодического закона» [15].

Исследования урановых руд Иоахимсталя продолжила Мария Склодовская-Кюри. Ей удалось практически решить проблему, в которой Браунер потерпел неудачу. Она обратилась к польскому посланнику в Париже. Политические отношения между Варшавой, Петербургом и Веной в те годы были достаточно благоприятными. Результатом этого вмешательства стало то, что австрийское правительство доставило 9000 кг урановой руды из Иоахимсталя в Париж. Целый год супруги Кюри пытались добиться того, что не удалось Браунеру. Они смогли выделить новый чрезвычайно радиоактивный элемент – радий, а позднее еще и полоний (рис. 7) [14].

Заключение

Считается, что Нобелевская премия 1903 г. по физике была заслужено присуждена Анри Беккерелю, «случайно» открывшему неизвестные ранее лучи, и супругам Кюри, которые самоотверженно, не представляя опасности, шаг за шагом прокладывали дорогу будущим поколениям исследователей тайн радиоактивности. Первоначальная ошибка в выводах А. Беккереля о природе явления кроется в семейной традиции изучения фосфоресценции, вызванной солнечным светом. Преклонение перед авторитетом деда и отца не позволило ему усомниться в их выводах, которые он принимал безоговорочно. Почти за 40 лет до этого более правильное понимание процесса описал, опережая время, Ньепс де Сен-Виктор. Изучая различные вещества для получения стабильной фотоэмульсии, он сразу решил, что действие солей урана на фотопластинку вызывается невидимыми излучениями материи, не связанными с их флуоресценцией. Современники не оценили его работу по достоинству. Только в 1896 г., после доклада Беккереля, многие вспомнили о публикациях Ньепса в бюллетенях Академии в 1857–1867 гг. и посчитали, что Беккерель просто повторил его опыты. Ныне многие отдают приоритет в открытии радиоактивности именно Ньепсу де Сен-Виктору.

Литература

1. Зайцева Л. Л., Фигуровский Н. А. Исследования явлений радиоактивности в дореволюционной России. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 223 с.
2. Перетрухни В. Ф., Герман К. Э. 125-летие открытия радиоактивности и российско-французское сотрудничество в области радиохимии // Исторические ретроспективы и современные тенденции в физической химии, радиохимии и коррозионных исследованиях / Под ред. К. Э. Германа. – М.: Издательский дом «Граница», 2020. – С. 400–418.
3. Bohuslav Brauner Sohn. Wer hat das Radium entdeckt? Eine dokumentär-historische Studie // Chemiker-Zeitung. Chemische Apparatur (83 Jahrgang, 10 Juni), 1959. – № 11. – P. 372–374.
4. Dr. Gustave Le Bon. L'evolution de la matiere. – Paris. Ernest Flammarion, editeur, 1905. – 406 p.
5. Fathi Habashi. Niepce De Saint-Victor and the discovery of radioactivity // Bull. Hist. Chem., 2001. – V. 26. – № 2. – P. 104–105.
6. Fournier P., Fournier J. A. (1990). Niepce de Saint-Victor (1805–1870), M. E. Chevreul (1786–1889) et la decouverte de la radioactivite // New Journal of Chemistry, 1990. – V. 14 (11). – P. 785–790.
7. Fournier, Paul and Fournier, Josette (1999). Hasard ou mémoire dans la découverte de la radioactivié? // Revue d'Histoire des Sciences, 1999. – V. 52 (1). – P. 51–80.
8. H. Becquerel. Sur les radiations émises par phosphorescence, C. R. hebd. Séanc. Acad. Sci. Paris 122, 1896. – P. 420–421.
9. Niépce de Saint Victor. Première Memoire «Sun une nouvelle action de la lumière», C. R. Acad. Sci., 1857. – V. 45. – P. 811–815.
10. Niépce de Saint Victor. Cinquième Mémoire, C. R. Acad. Sci., 1861. – V. 53. – P. 33–35.
11. Niépce de Saint Victor. Sixième Mémoire, C. R. Acad. Sci., 1867. – V. 65. – P. 505–507.
12. Nobel lectures. Including presentation speech and laureates' biographies. Physics, 1901–1921. World Scientific. Singapore-New Jersey-London-Hong Kong., 2002. – 247 p.
13. Rothman, Tony. Everything is Relative and Other Fables in Science and Technology / Chapter 5. Invisible light: The discovery of radioactivity New Jersey: Wiley, 2003. – P. 46–52.
14. P. Curie, M. Curie. Sur une substance nouvelle radioactive, contenue dans la pechblende (On a new radioactive substance contained in pitchblende), C. R. hebd. Séanc. Acad. Sci. Paris?, 1898. – V. 127. – P. 175–178.
15. Soňo Štrbáňová, Miroslav Novák. Bohuslav Brauner – O vědeckém poznání a vědeckém přátelství // Homines scientiarum III: třicet příběhů české vědy a filosofie. [Praha]: Ústav pro soudobé dějiny AV ČR, v. v. i., 2015. – P. 9–28.

ЭТАПЫ СТАНОВЛЕНИЯ КАФЕДРЫ ГЕОЛОГИИ И РАЗВЕДКИ РУД РЕДКИХ И РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И РОЛЬ Л. П. РИХВАНОВА В ОТКРЫТИИ НОВЫХ НАУЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ

Е. Г. Язиков, В. А. Домаренко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050, yazikoveg@tpu.ru

THE STAGES OF FORMATION OF THE DEPARTMENT OF GEOLOGY AND EXPLORATION OF RARE AND RADIOACTIVE ELEMENTS ORES AND THE ROLE OF L. P. RIKHVANOV IN THE DISCOVERY OF NEW SCIENTIFIC DIRECTIONS

E. G. Yazikov, V. A. Domarenko

Tomsk Polytechnic University
Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050, yazikoveg@tpu.ru

The history of the formation of the department goes back to the distant forties, but a new stage began with the training of specialists in the field of uranium geology. There is a transformation of the structure and name of the department, but the graduation of uranium geologists, and then geoecologists with knowledge of radioecology issues continues. The great merit of L. P. Rikhvanov is in the opening of new directions of the department on radioactive topics. With his participation, detailed mineralogical and geochemical studies using modern nuclear physics methods and developed on the basis of the research nuclear reactor of the Tomsk Polytechnic University began to prevail. The methods of radiographic analysis have been mastered, which make it possible to determine both the level of accumulation and the distribution of radioactive elements with high accuracy. During these years, radiogeochemical research methods made possible to solve not only geological, but also environmental and technological problems.

Кафедра месторождений полезных ископаемых открыта в 1931 году. Организатор и первый заведующий – будущий член-корреспондент АН СССР Ф. Н. Шахов (1931–1949 гг., 1954–1956 гг.). Выдающийся советский учёный член корреспондент АН СССР, профессор Феликс Николаевич Шахов (1894–1971 гг.) около 35 лет своей жизни посвятил учебной, научной и административной работе в Томском политехническом институте. Здесь он окончил в 1922 году отделение Томского технологического института и был оставлен по рекомендации профессора М. А. Усова для учебно-научной работы. Ученик академика Михаила Антоновича Усова, Феликс Николаевич Шахов в 1931 году организует и возглавляет кафедру Рудных месторождений (позднее кафедра Месторождений полезных ископаемых), которой руководит вплоть до своего перехода на работу в Сибирское отделение АН СССР (1956 г.). В этот период профессор Ф. Н. Шахов успешно внедряет новейшие методики исследования руд, публикует ряд учебных пособий и монографических работ по вопросам теории рудообразования, занимается административной деятельностью в должности декана геологоразведочного факультета. Одновременно он оказывает серьёзную помощь производственным организациям. Большой вклад им сделан для укрепления и создания территориальных и специализированных геологических организаций в Западной Сибири и в деле создания минерально-сырьевой базы чёрных, цветных и редких металлов для развивающейся промышленности в восточных районах нашей страны.

В период с 1949 по 1954 гг. кафедрой заведовал доцент А. И. Александров. В 40-е – 50-е годы он активно развивал исследования редкометалльного оруденения Алтая (ртуть, вольфрам, молибден, бериллий и др.). Им была подготовлена к защите докторская диссертация на тему «Вольфрамовые месторождения Алтая», но преждевременная смерть прервала все начатые им чрезвычайно важные для страны работы. Они прервались на факультете на десятилетия.

В 1954 году из состава кафедры месторождений полезных ископаемых была выделена в связи с открытием специализации по геологии редких и радиоактивных элементов (приказ Мингео СССР от 29.09.1954 г.) кафедра геологии и разведки руд редких и радиоактивных элементов (зав. кафедрой профессора Ф. Н. Шахов с 1954 по 1956 гг. и В. К. Черепнин с 1956 г.). Следует отметить, что создание кафедры с аналогичным названием было предусмотрено ещё Приказом Министерством Высшего образования СССР № 23 сс/оп в 1950 году в составе физико-технического факультета, тогда же был назначен и её и.о. заведующий, доцент Сивов А. Г. (приказ 756 сс/оп от 03.11.1950 г.). Но по каким-то причинам эта кафедра в составе физико-технического факультета функционировать не стала.

Владимир Константинович Черепнин (1916–1985гг.) в 1939 году окончил Томский государствен-

ный университет. В Томском политехническом институте работал с февраля 1944 года. Окончил аспирантуру при кафедре Месторождений полезных ископаемых и на всю жизнь связал судьбу с геологоразведочным факультетом. В 1947 году защитил кандидатскую диссертацию. С января 1947 года работал на кафедре минералогии и кристаллографии сначала ассистентом, а с 1949 года – доцентом. В 1954 году переведён на кафедру месторождений полезных ископаемых. В. К. Черепнин был одним из основателей первой в вузах Сибири специализации и кафедры геологии и разведке руд редких и радиоактивных элементов, которой заведовал более 20 лет: в 1956 году кафедрой геологии и разведки руд редких и радиоактивных элементов, а затем объединённой кафедрой месторождений полезных ископаемых и разведки руд редких и радиоактивных элементов. В 1968 году Учёным Советом Томского политехнического института был утверждён в должности профессора, а в мае 1974 года решением ВАК СССР ему присвоено учёное звание профессора.

В конце 1956 года на базе двух кафедр была создана объединенная кафедра месторождений полезных ископаемых и разведки руд редких и радиоактивных элементов.

В 1963 году кафедра была временно объединена с кафедрой геологии и разведки МПИ. В эти годы (1963–1967 гг.) кафедрой заведовал доцент В.Я. Коудельный.

В 1981 году кафедру МПИ и разведки руд редких и радиоактивных элементов возглавил доцент Л. П. Рихванов. В 1990 году кафедра получила новое название: кафедра Полезных ископаемых и геохимии редких элементов (ПИГРЭ), а в 2002 году переименована в кафедру Геоэкологии и Геохимии (ГЭГХ) (Приказ № 152 от 26.10.2002 год).

Первый выпуск горных инженеров-геологов по редкометалльному профилю состоялся в 1956 году. В 1957 году было сделано два выпуска: первый – в феврале, второй – в декабре. Стране требовались специалисты – уранщики. Всего по состоянию на 01.08.1997 год кафедрой подготовлено 756 специалистов-редкометалльщиков при приёме студентов 25 человек. Из них дипломы с отличием получили 61 человек. Подавляющее большинство выпускников было распределено на работу в специализированные предприятия Министерства геологии СССР. Пятнадцать выпускников стали докторами наук. Дипломы первооткрывателя месторождений получили 35 выпускников и 4 сотрудника кафедры. Многие выпускники за выдающиеся успехи в работе награждены орденами и медалями, в том числе двое – высшей наградой СССР – орденом Ленина (В. А. Шлейдер, В. С. Чечеткин). Лауреатами Государственной премии СССР стали сотрудник кафедры Вьюнов Ф. И. и её выпускники: В. А. Шлейдер, Н. И. Рубанов, В. А. Медведев. Среди выпускников кафедры – бывший заместитель Министра геологии СССР (М. В. Толкачёв), заместитель председателя ГКЗ Республики Казахстан (Мазуров А. К.), вице-президент корпорации «Казатомпром» (Язиков В. Г.), генеральные директора ПГО (Е. А. Воробьев, Ю. Г. Гненной, А. П. Коновалов, В. Г. Брыкин, Ф. И. Волков и др.), главные геологи и инженеры ПГО (С. Л. Николаев, С. А. Егоров, А. А. Новгородцев др.), руководители геологических отделов ПГО (В. Т. Рябухин и др.). Большое количество воспитанников кафедры являлось руководителями и главными специалистами структурных подразделений ПГО (А. В. Колбасин, В. А. Домаренко, В. А. Пантелеев, В. К. Кондрин, В. П. Тузиков, Г. А. Яичников, В. А. Шлейдер, В. И. Медведев, Ю. Н. Новиков, С. А. Седышев, А. А. Данилов, В. Ю. Пережогин, В. С. Машенькин, Е. А. Митрофанов и др.). Многие из них возглавляли и в настоящее время некоторые возглавляют геологические службы совместных Казахско-Французских, Казахско-Российских и других предприятий, входящих в консорциум НАК «Казатомпром» (Пантелеев В., Тузиков В. П., Чевгун В., Матунов А., Седышев С. и др.), а также работали в зарубежных компаниях (Семененко Е., Машенькин В. С. и др.).

Выпуск специалистов кафедры по годам выглядит следующим образом (в скобках указано количество выпускников, получивших дипломы с отличием): 1956–1960 гг. ÷ 110 (7); 1961–1965 гг. ÷ 73 (5); 1966–1970 гг. ÷32 (5); 1971–1975 ÷ 110 (3); 1976–1980 гг. ÷ 88 (4); 1981–1985 гг. ÷ 81 (8); 1986–1990 гг. ÷ 79 (5); 1991–1995 гг. ÷ 73 (10); 1996–1997 гг. ÷ 18 (6). В 1998–1999 гг. в связи с внедрением в ТПУ многоуровневой системы подготовки (бакалавр, магистр, специалист), на кафедре состоялся выпуск бакалавров по направлению «Геология» в 1998 г., а через год они же защитили диплом специалиста. В 1997 году, в связи с отсутствием целевого заказа, состоялся последний выпуск геологов-редкометалльщиков. С 1995 г. кафедра начала очную, а с 1996 года и по заочной форме подготовку кадров по специальности «Геоэкология». В 2008 году на базе кафедры геоэкологии и геохимии был создан Международный научно-образовательный центр подготовки специалистов в области урановой геологии для развития ядерной энергетики. Профессор, доктор геолого-минералогических наук Л. П. Рихванов руководил кафедрой с 1981 г. по июнь 2011 г. С июня 2011 г. по конец 2017 года кафедру возглавлял д.г-м.н. профессор Е. Г. Язиков.

Начиная с 1972 года, в работе кафедры по радиоактивной тематике стали преобладать детальные минералого-геохимические исследования с использованием современных ядерно-физических методов, развиваемых на базе исследовательского ядерного реактора (ИРТ) Томского политехнического университета и аспирант Л. П. Рихванов активно включился в работу коллектива.

К этому времени на базе реактора была впервые отработана методика высокоточного определения урана методом запаздывающих нейтронов (МЗН) в

любых объектах без разрушения материалов, которая была апробирована на различных материалах и официально утверждена (Вертман и др., 1979), а сотрудниками кафедры были в полном объёме освоены методики радиографического анализа, позволяющие с высокой точностью определять как уровень накопления, так и особенности распределения радиоактивных элементов, прежде всего урана (Рихванов, 1972, 1975, 1988).

Именно разработка минералого-геохимических критериев и признаков прогнозирования, поисков и оценки уранового оруденения в горно-таёжных зонах становится основной темой исследования кафедры в период с 1975 по 1990 гг., а тема «Радиогеохимическая паспортизация метасоматических формаций и постмагматических месторождений» становится составной частью программы «Сибирь» (раздел 15, пункт 1.6.а), как одна из предпосылок создания фундаментальной геохимической основы для поисков месторождений на территории Средней Сибири.

Реализации данного научного направления способствовало и то, что в практику полевых исследований, начиная с 1972 года, стал внедряться метод полевой гамма-спектрометрии (ГСП). Гамма-спектрометрическое определение радиоактивных элементов в полевых условиях привлекло внимание в силу своей исключительной экспрессности, мобильности и достаточно высокой чувствительности и точности для решения прикладных радиогеохимических задач. Этот метод дал возможность использовать не только статистический подход в радиогеохимических исследованиях, но и корректировать проведение полевых работ, устанавливать тенденции и динамику изменения радиогеохимических параметров пород и руд непосредственно в процессе их геологического изучения, осуществлять более представительный отбор проб.

Многолетний опыт сотрудников кафедры использования его как основного полевого геохимического метода подтвердил его высокие качества.

За этот период времени по данному направлению были защищены кандидатские диссертации Л. П. Рихвановым (1975), В. А. Домаренко (1979), Е. Г. Язиковым (1983), А. А. Поцелуевым (1984), С. И. Арбузовым (1989), а результаты этих разработок нашли отражение в закрытых отчётах по НИР (около 30), составленных при участии А. А. Беляева, С. А. Лыкова, С. Л. Сачкова, В. А. Куклина, В. В. Ветрова, Л. Э. Федориной, С. И. Сарнаева, А. Ю. Никифорова, В. М. Советова, А. Н. Уварова, С. Л. Николаева, В. Г. Колосова, В. В. Ершова, П. Г. Падерина и др., а также в многочисленных публикациях (более 100 работ), в авторских свидетельствах на способы радиографических исследований и способы поисков урановых месторождений (5).

Под руководством Л. П. Рихванова исследования рудно-магматических систем (магматиты – метасоматиты – руды) указывают на весьма высокое индикаторное значение урана и тория для решения вопросов теории и практики рудогенеза, прогнозирования, поисков и оценки эндогенных месторождений полезных ископаемых.

Проведённые в этом направлении работы (Рихванов, 1975, 1999; Рихванов и др., 1982, 1983, 1985, 1987; Арбузов, 1988; Арбузов и др., 1987; Поцелуев, 1984; Язиков, 1981 и др.) позволили рекомендовать ряд оценочных, прогнозных, поисковых и поисково-разведочных критериев уранового оруденения применительно к горно-таёжным районам Алтае-Саянской складчатой области.

Дальнейшие работы сотрудников кафедры под руководством Л. П. Рихванова в 80–90-е годы по практическому использованию индикаторной роли естественных радиоактивных элементов с использованием современных ядерно-физических методов, в том числе полевых и дистанционных, показали, что радиогеохимические методы исследования позволяют решать не только многие геологические, но и экологические, и технологические задачи (поиски углеводородного сырья; радиоэкологическая оценка территорий; типизация, оценка и разбраковка почв, торфов, минеральных удобрений и т. д.).

Так, проведённые исследования по изучению уровня накопления естественных радиоактивных элементов в почвах (Рихванов и др., 1994, 1995; Рихванов, 1995, и др.) показали, что накопление урана и тория в почвах зависит не только от генетического типа почв, от количества гумуса, фосфора и железа в почвах, но и от факторов загрязнения внешней среды. В зонах влияния предприятий ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) уровень накопления урана более существенен, чем вне зон влияния. Наиболее важным оценочным показателем является величина отношения тория к урану.

Существующие взаимосвязи между уровнем накопления фосфора, гумуса и радиоактивных элементов позволяют производить в полевых условиях агрогеохимическую оценку почв (Рихванов и др., 1992, 1993). Проводимые исследования по радиогеохимическому изучению углей (Рихванов и др., 1996; Рихванов и др., 1998; Ершов, 2000; Арбузов и др., 2000) свидетельствуют о том, что данные химические элементы могут использоваться как для целей типизации углей и угольных бассейнов, так и для целей корреляции угленосных толщ, решения некоторых генетических вопросов углеобразования.

Начиная с 1996 года на кафедре активно разрабатывается под руководством Л. П. Рихванова технология прогнозирования и поисков месторождений углеводородного сырья радиогеохимическими методами (Соболев, 1999 и др.). Использованием некоторых методических приёмов китайских исследователей (ТЛД на основе LiF), и реализуя наработанный опыт радиогеохимических работ при поисках урано-

вых месторождений, разработана технология прогнозирования и поисков углеводородных залежей (УВЗ) в условиях Западной Сибири.

Накопленный многолетний опыт под руководством Л. П. Рихванова по использованию естественных радиоактивных элементов как трассеров природных геологических процессов, созданная материально-техническая база (функционирование на кафедре ядерно-геохимической лаборатории, оснащённой современной аппаратурой лабораторного и полевого типов и т. д.) позволили в девяностых годах XX века активно включиться в решение радиоэкологических проблем, обусловленных деятельностью предприятий ядерно-топливного цикла, испытанием ядерного оружия в атмосфере (Рихванов, 1997 и др.).

Применяя радиогеохимические приёмы выявления урановорудных объектов, стали выявлять и фиксировать проявленность техногенных источников радионуклидов. В результате выполнения программы радиационно-экологического мониторинга установлены признаки, по которым может быть определено, например, влияние Сибирского химического комбината (СХК) на окружающую среду. Используя хорошо поставленный на кафедре метод осколочной радиографии, (Рихванов, 1997, 1999; Рихванов и др., 1998 и др.) удалось показать, что в зонах влияния ядерных производств сформировались специфические природно-техногенные биогеохимические районы.

Следует отметить, что исследованиями Л. П. Рихванова с сотрудниками кафедры отмечается чрезвычайно важная индикаторная роль радиоактивных элементов в биологических материалах (Барановская Н. В., Денисова О. А., Игнатова Т. Н. и др.), на что обращалось внимание еще в первой половине XX века В. И Вернадским, А. П. Виноградовым и другими. При этом, достаточно точно выявляется, что уровни их накоплении, отношения элементов (Th/V, B/V, Cd/U и др.) отражают не только геохимическую специфику среды обитания и степени ее трансформации, но и их физиологическое состояние в норме и патологии.

Сегодня можно с уверенностью утверждать, что радиоактивные элементы и методы их исследования могут широко использоваться для решения многих научных и практических задач в науках о Земле, благодаря активным исследованиям профессора Л. П. Рихванова.

С января 2018 года в Томском политехническом университете, в связи с реформами, все кафедры были ликвидированы, а на их месте были созданы укрупненные отделения, в т. ч. и отделение геологии, которое объединило кафедры геоэкологии и геохимии; гидрогеологии и инженерной геологии; геофизики; геологии и разведки месторождений полезных ископаемых) в Инженерной школе природных ресурсов. В настоящее время на бывшей кафедре геоэкологии и геохимии ведется подготовка бакалавров и магистров по направлению «Экология и природопользование», а также геологов по направлению «Геология» профиль «Геология месторождений стратегических металлов».

В написании статьи использованы различные исторические материалы, в т. ч. книга: И лучшей судьбы не хотим: Очерки / под ред. В. А. Домаренко и Л. П. Рихванова. – 3-е изд. доп. и перераб. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010.

Авторы благодарны за представленные материалы.

К 120-ЛЕТИЮ ЮРИЯ АЛЕКСАНДРОВИЧА БИЛИБИНА

Ю. Б. Миронов, А. М. Карпунин, В. З. Фукс

ВСЕГЕИ

Санкт-Петербург, Россия, Yuri_Mironov@vsegei.ru, Anatoly_Karpunin@vsegei.ru, Vladimir_Fuks@vsegei.ru

TO THE 120th ANNIVERSARY OF YURI ALEXANDROVICH BILIBIN

Yu. B. Mironov, A. M. Karpunin, V. Z. Fuks

VSEGEI

Sankt-Petersburg, Россия, Yuri_Mironov@vsegei.ru, Anatoly_Karpunin@vsegei.ru, Vladimir_Fuks@vsegei.ru

The main aspects of the activity of the outstanding Russian geologist Yu. A. Bilibin, one of the founders of the Russian metallogenic science, are considered.

19 мая 2021 г. исполняется 120 лет со дня рождения выдающегося геолога Юрия Александровича Билибина, крупного ученого, члена-корреспондента АН СССР, одного из основоположников отечественной металлогенической науки. Он рано ушел из жизни – ему был всего 51 год, однако вклад его в теоретическое и практическое развитие геологии трудно переоценить. Обладая блестящим творческим умом,

целеустремленностью, трудолюбием, тяге к знаниям он мог генерировать новые научные идеи и концепции, реализация которых на практике всегда приводила к впечатляющим результатам и открытиям – а это очень важно, особенно в геологии, при поисках остро востребованных народным хозяйством полезных ископаемых для расширения и укрепления минерально-сырьевой базы страны.

Первый, исключительно плодотворный и длительный период своей деятельности Юрий Александрович посвящает исследованию новых золотоносных районов восточной части нашей страны. Вначале Ю. А. Билибин работает на Алдане, где им открыто коренное месторождение золота. Затем в 1928–1929 гг. Юрий Александрович с группой геологов организует Первую Колымскую экспедицию, положившую начало планомерным геологическим исследованиям этого края. Полученные результаты позволили ему высоко оценить перспективы этого региона на золото. Применив разработанный им геолого-статистический метод оценки возможных запасов золота в новом районе, даже при очень осторожном подходе была получена достаточно высокая цифра, что позволило ему сделать предположение, что Колымский золотоносный район, будет значительно крупнее Алдана и богаче Аляски.

По словам академика С. С. Смирнова «смелый научно обоснованный прогноз Билибина, являющийся самым ярким среди всех геологических прогнозов, и составленная им в связи с этим докладная записка в Правительство, явились главным толчком к развороту громадных работ» на Северо-Востоке страны» [2]. К 40-м годам Колыма становится «валютным цехом страны». В 1940 году здесь было добыто максимальное количество золота – 80 т.

По материалам изучения Северо-Востока СССР Ю. А. Билибин написал монографию «Основы геологии россыпей» (1938 г.), в которой впервые в мировой практике всесторонне освещаются геологические особенности россыпных месторождений золота; вместе с этим им написан также ряд крупных работ по петрологии.

Во время Великой Отечественной войны Ю. А. Билибин в 1941–1943 гг. плодотворно работает по изучению редкометальных месторождений в Средней Азии, а в 1943–1944 гг. назначается главным геологом «Главзолото».

С 1944 г. уже во ВСЕГЕИ, начинается второй яркий и, к сожалению, короткий период деятельности Юрия Александровича Билибина. В полной мере раскрывается и реализуется на практике его талант блестящего теоретика в сочетании с выдающимися организаторскими способностями. Ю. А. Билибин начинает развивать региональные металлогенические исследования, которые распространились на большую часть страны. Он вовлекает в работу коллективы геологов и увлекает их новыми идеями. В 1945–1946 гг. был организован коллектив Тувинской экспедиции, а в

1947 г. – сектор металлогении ВСЕГЕИ, впоследствии переименованный в Отдел специсследований (позже Отделение специальной металлогении). В результате этих исследований им были сформулированы основные положения металлогенической науки и основы регионального металлогенического анализа. Металлогения урана как самостоятельная и вместе с тем неотъемлемая часть всей металлогенической науки зародилась в первые послевоенные годы в связи с жизненной необходимостью форсированного создания минерально-сырьевой базы урана для реализации отечественного атомного проекта [1]. Суть новой концепции в том, что процессы минерализации, ведущие к возникновению минеральных и, в частности, рудных месторождений, представляют одну из сторон единого и сложного процесса развития земной коры и неразрывно взаимосвязаны с осадконакоплением, тектоникой (развитием структур), магматической деятельностью и метаморфизмом. На основе новой концепции коллектив отдела специсследований ВСЕГЕИ создавал первые металлогенические карты ряда регионов (Урал, Казахстан, Средняя Азия, Алтае-Саянская область, Забайкалье и др.) а затем и металлогенические карты СССР в масштабе 1 : 5 000 000, 1 : 2 500 000.

С 1950 г. Ю. А. Билибин возглавляет кафедру полезных ископаемых в Ленинградском университете. Здесь за исключительно короткий срок им был написан и прочитан новый курс «Металлогенические эпохи и провинции», который был опубликован уже после его смерти. В работе был синтезирован огромный материал по металлогении всех складчатых областей на континентах, она явилась отправной вехой дальнейшего развития созданной Ю. А. Билибиным новой ветви геологических знаний – металлогении.

Во ВСЕГЕИ под его руководством с самого начала разработки основ региональной металлогении урана как самостоятельного научно-практического направления реализовывалось положение о специфике проявленности процессов уранового рудоо-

бразования в типовых геоструктурах земной коры – подвижных поясах, щитах и плитах древних и молодых платформ. Совершенствовалась структура отдела специсследований, были организованы сектора (позднее отделы) складчатых областей, щитов, чехлов платформ, методики прогнозирования и поисков, главным направлением деятельности которых было создание мелко- и среднемасштабных металлогенических карт и выделение локальных структур и участков под поиски промышленных урановых месторождений на основе изучения геологического строения и рудоносности основных типов структур и определение направлений специализированных работ на уран в их пределах. Основным методом металлогенических построений служил структурно-формационный анализ, дополненный позднее радиогеохимическим картированием и другими видами предметных исследований. В начале 50-х годов на первых металлогенических картах, составленных для Казахстана, Средней Азии, востока России, нашли отражение главнейшие закономерности в размещении различных типов рудных месторождений в связи с особенностями истории геологического развития отдельных участков земной коры. Убедительные подтверждения правильности и применимости концепций и методических принципов металлогенического коллектива ВСЕГЕИ были получены после выявления урановорудных районов в Российской Федерации, Украине, Казахстане, Узбекистане. Дальнейшие научные и методические разработки металлогенического коллектива позволили усовершенствовать представления о металлогении крупных блоков земной коры и методологии комплексных геологических, геофизических и геохимических исследований. Значительно уточнились представления о связи металлогении и тектоники, и, особенно, о роли разновозрастных рудоносных структур. Итоговые обобщения внесли новые представления в проблему строения и эволюции литосферы и позволили повысить уровень прогнозирования. Прогнозные и металлогенические карты стали обязательными документами и в территориальных геологических организациях Министерства геологии [1].

Работая во ВСЕГЕИ Юрий Александрович никогда не терял связи с многочисленными производственными организациями, выступал с докладами, выполнял экспертизы, давал консультации.

Юрий Александрович был высоко эрудированным специалистом-энциклопедистом. Его огромный опыт, готовность всегда помочь ценными советами, личное обаяние привлекли к нему большое количество работников науки и производства, многие из которых стали его учениками и последователями. Творческое наследие Ю. А. Билибина составляют четыре объемных тома академических трудов, являющихся для геологов настоящим ларцом творческой мысли.

Для специалистов ОГУМРЭ ВСЕГЕИ металлогенические постулаты Ю. А. Билибина и в настоящее время являются направляющими ориентирами при выполнении тематических исследований не только по урану, но и по широкому спектру радиоактивных, благородных, редкометалльных и редкоземельных металлов [4, 5]. Им также неуклонно следуют и специалисты РАН [3].

Ю. А. Билибин удостоен Государственной премии. Имя Юрия Александровича присвоено одной из первых атомных электростанций на северо-востоке страны («Билибинская»), его именем названы город Билибино, улицы в Магадане и Алдане. Его память увековечена в названиях двух новых минералов – билибините и билибинските.

В парус памяти бьются ветра
И зовут позабытых когда-то,
Чтобы вспомнилось наше вчера,
Все ушедшие в поиск ребята.
Но не им, нам сегодня нужна,
Юбилейная дата, как веха,
Как признанье, что все имена
Возвратит наших праздников эхо,
И костер наш сегодня зажжен
В память всех не обласканных славой
Кто ходил по Земле и в неё был влюблён
Кто писал ей истории главы!

(геолог Людмила Глотова, Магадан) [2].

Литература

1. Геологи ВСЕГЕИ в создании урановорудной базы страны / Редакторы Ю. М. Шувалов, Ю. Б. Миронов, А. М. Карпунин. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2006. – 160 с.
2. Геологи Северо-Востока. 80 лет Первой Колымской экспедиции / Авт.-сост. Ю. Прусс. Ред. П. Жданов. Магадан. – Изд-во «Охотник», 2008. – 148 с.
3. Месторождения стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации: закономерности размещения, условия формирования, инновационные технологии прогноза и освоения: Научные результаты, полученные при выполнении программы № 1.48 фундаментальных исследований Президиума РАН / Главный редактор – академик РАН Н. С. Бортников. Ответственный составитель чл.-корр. РАН В. А. Петров. – М.: ИГЕМ РАН, 2020. – 317 с.
4. Минерально-сырьевой потенциал недр Российской Федерации. Том 1: Прогнозно-металлогенический анализ / Науч. ред. О. В. Петров. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. – 224 с.

5. Миронов Ю. Б., Карпунин А. М., Фукс В.З. Металлогения тория Российской Федерации. Региональная геология и металлогения. – № 84,2020. – С. 106–116.

О РЕНЕССАНСЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ШКОЛЫ УРАНОВОЙ ГЕОЛОГИИ

А. А. Верчеба

Российский государственный геологоразведочный университет
Москва. Россия, verchebaaa@mgri.ru

ABOUT THE RENAISSANCE OF THE GEOLOGICAL SCHOOL OF URANIUM GEOLOGY

A. A. Vercheba

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
Moscow, Russia, verchebaaa@mgri.ru

The article shows the predominating role of energy resources and energy carriers in a mineral and raw complex of the country. The success of the development of MRB of the country in many respects is defined by the professionalism of shots of the branch. For the realization of the Russian MRB strategy development until 2035 need of preparation of a personnel reserve for the system of the higher education on new educational programs a federal state educational standard Applied geology is proved.

Введение

В обществе и среди ученых геология начинает пониматься не только как наука о поисках полезных ископаемых, а существенно глубже – как наука о истории и жизни человеческой цивилизации, теснейшим образом связанной со всем вещественным составом окружающей среды.

Современное состояние горно-геологической науки, методологический и технологический аппарат, который она использует, представляет собой наиболее объективный индикатор экономического и социального развития любой общественной системы. Особенно явно это проявлено при анализе современного состояние минерально-сырьевого комплекса (МСК) России.

Приоритетом развития МСК Российской Федерации является экономически обоснованный баланс внутреннего потребления минерального сырья, импорта, экспорта с учетом рыночного спроса на полезные ископаемые.

Системообразующим компонентом МСК является минерально-сырьевая база (МСБ), под которой мы понимаем подготовленную и доступную к освоению часть минеральных ресурсов или совокупность месторождений полезных ископаемых на территории страны, федерального округа, промышленного региона.

Для устойчивого развития минерально-сырьевой базы необходимо обеспечивать её воспроизводство и рациональное обеспечение минеральным сырьем с целью долгосрочного поддержания стабильного уровня экономической и энергетической безопасности Российской Федерации. Механизмы достижения указанной стратегической цели представлены в «Стратегии развития минерально-сырьевой база Российской Федерации до 2035 года», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.12.2018 № 2914-р [5].

Материалы и методы

Приоритетными направлениями укрепления минерально-сырьевой базы на основе качественного геологического исследования недр является освоение месторождений на основе использования технологий полной переработки минерального сырья и комплексного извлечения полезных компонентов.

Экономическое значение МСБ определяется как геологическими и природными факторами, так и сложностью геотехнологии разработки и глубокой переработки минерального сырья, развитием инфраструктуры районов добычи полезных ископаемых и конъюнктурой цен сырья на мировом рынке.

Минеральное сырьё это извлеченные из недр на земную поверхность полезные ископаемые, добытые полезные ископаемые. В зависимости от непосредственного применения минерального сырья в различных сферах материального производства добытые полезные ископаемые разделены на группы: энергоносители, руды металлов, горно-химическое сырье, строительные материалы, технические и дра-

гоценные минералы. Так, например, потребителями энергоносителей являются топливно-энергетический комплекс и химическая промышленность.

Экономическое значение энергоносителей определяется тем, что стоимость их ресурсов, разведанных на территории России, по информации Минприроды РФ составляет (трлн рублей): нефть – 74,5; газ – 14,1; коксующийся уголь более 2,0.

Минерально-сырьевая безопасность нашей страны во многом определяется состоянием и развитием именно энергетических отраслей материального производства. Энергетический баланс в мире составляет: уголь 28 %, нефть 31 %, газ 22 %, а на другие источники приходится 18 %. К важнейшим видам энергоносителей, добываемых из недр на территории России, также относятся уголь, нефть, газ и уран [3, 4].

Перспективы наращивания минерально-сырьевой базы энергоносителей и создание условий для обеспечения страны энергетическим сырьем должны быть увязаны с кадровой обеспеченностью отрасли совместными усилиями образовательных организаций высшего образования, академических, отраслевых институтов, недропользователей в системе подготовки специалистов геологов. Новым подходом к подготовке кадров является принцип сопряжения компетенций выпускников вузов с квалификационными требованиями и обобщёнными трудовыми функциями специалистов отрасли. Это нашло отражение в федеральном государственном образовательном стандарте высшего образования – специалитет по специальности Прикладная геология [8].

Образовательная программа Прикладной геологии, построенная на компетентностном подходе к формированию профессиональных знаний, навыков и умений, направлена на подготовку специалистов, в том числе по геологии и разведке месторождений твёрдых полезных ископаемых, включая месторождения радиоактивных руд.

Во второй половине XX века в ходе решения урановой проблемы на территории СССР были выявлены совершенно новые урановые рудные районы и месторождения. Запасы урана в СССР за короткий послевоенный пятилетний период были увеличены на порядок с 470 до 5500 тонн.

Советская урановая геология достигла выдающихся успехов в приросте запасов урана как в своей стране, так и за рубежом [6].

В конце XX века в СССР на полную мощность работали восемь горно-химических комбинатов, которые с горнодобывающими предприятиями восточной Европы добывали ежегодно около 28 тыс. тонн урана или 40 % мировой добычи и Советский Союз вышел на первое место в мире по запасам урановой руды и производству урана [7].

Создание сырьевой базы урана потребовало подготовки квалифицированных специалистов по урановой геологии.

С этой целью в некоторых вузах страны были созданы специальные факультеты для подготовки специалистов горно-геологического профиля. Одни из первых факультетов возникли в Московском институте цветных металлов и золота (Цветмет), Московском геологоразведочном институте (МГРИ) и Томском политехническом институте (ТПИ). Качественная подготовка инженерных кадров способствовала сравнительно быстрому созданию надёжной минерально-сырьевой базы урана и развитию ядерной энергетики [1, 2].

После распада СССР начался резкий спад по разведке, разработке и переработке урановых руд. Прекратилась и целенаправленная подготовка специалистов для ядерной отрасли в связи с сокращением специальностей подготовки горных инженеров. Хотя по запасам урана и тория в недрах Россия занимает третье место в мире (после Австралии и Казахстана), но по качеству запасов уступает всем его ведущим производителям. Основная часть запасов России на рынке уранового сырья относится к наименее инвестиционно привлекательной ценовой категории 80–130 $ US/кг. Эти запасы урана нерентабельны. За счет собственной добычи удовлетворены только 20 % потребности страны в уране.

В современных геополитических и экономических условиях развитию производства урана в России нет альтернативы. Прежде всего необходимо переоценить металлогенический потенциал территории России. Основной задачей геологоразведки является выявление и обоснование новых поисковых площадей на основе проведения среднемасштабных минерагенических исследований и опережающих поисковых работ, в которых должны быть объединены усилия отраслевой, академической и вузовской науки [1, 3].

Увеличившаяся глубина залегания и трудная доступность потенциальных урановых месторождений требует научно обоснованного создания прогнозно-поискового комплекса и геолого-структурных моделей геолого-экономических типов месторождений на основе комплексирования методов опережающих квазиназемных геохимических и геофизических исследований недр, а также новых технологий горно-буровых работ, в том числе колтюбингового многозабойного бурения.

Учитывая исторический опыт создания минерально-сырьевой базы урана в нашей стране практически с нуля и объективную роль в этом созидательном процессе советского инженерного геологического образования актуально возродить подготовку инженеров-уранщиков в российских вузах [2].

Решение проблемы состояло в создании учебно-научных кластеров на базе университетов и ве-

дущих предприятий отрасли. Как пилотный проект была создана базовая кафедра комплексной оценки месторождений в ведущем отраслевом научно-исследовательском институте ФГБУ ВИМС по подготовке и переподготовке обучающихся, в том числе для урановой геологии. Базовая кафедра реализует магистерскую программу «Геология месторождений стратегических видов полезных ископаемых», которая прошла государственную аккредитацию в 2020 г. Ежегодно по программе обучаются 6–8 магистрантов, в том числе из иностранных государств, что подтверждает востребованность подготовки специалистов данной сферы.

Подготовка магистров по направлению «Геология» – профиль «Геология месторождений радиоактивного сырья» проводится с использованием материальной и научно-методической базы «Урановой геологии», в Томском политехническом университете, также уникальной коллекции минералов и руд урановых и редкометалльных месторождений.

В этом огромная заслуга профессора Л. П. Рихванова, памяти которого посвящена конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». Выпускники «Урановой геологии» работают в компаниях ОАО «Приаргунский ГХК», ОАО «Далур», НАК «Казатомпром» и др. С 2014 г. в ТПУ открылся профиль магистратуры «Геология месторождений стратегических металлов», который расширяет области подготовки специалистов с учетом геологии месторождений радиоактивных, редких и редкоземельных элементов.

Для возрождения подготовки современных геологов-уранщиков необходимо восстановить существовавшее ранее дополнительное финансирование для студентов, аспирантов и преподавателей, занимающихся с радиоактивными материалами и рудами и оказать содействие в техническом оснащении лабораторий и кафедр университетов современным оборудованием для подготовки инженеров геологов, геофизиков, геотехнологов для работы в урановой отрасли.

В образовательные программы подготовки специалистов-уранщиков следует включить дисциплины по развитию навыков выявления слабопроявленного уранового оруденения с применением инновационных методик комплексного геофизического картирования с выделением урансодержащих метасоматитов, минералогического картирования на основе рентгенофазового анализа, использования аэро-гаммаспектрометрических и радиоизотопных методов, в том числе изотопно-почвенного метода, разработанного в ВИМС.

Новые образовательные программы высшего образования по прикладной геологии, составленные на основании федерального государственного стандарта высшего образования в 2021 г. – специалитет по специальности 21.05.02 Прикладная геология предусматривают организацию обучения по специализации «Разведка и оценка стратегических видов полезных ископаемых» с привлечением научно-технических работников базовых кафедр отраслевых и академических организаций [8].

Результаты и их обсуждение

Экономическое значение многих видов минерального сырья для России трудно переоценить, именно их экспорт составляет 80 % поступлений в бюджет российской экономики [3].

Перспективы наращивания минерально-сырьевой базы энергоносителей, в том числе урана и создание условий для обеспечения страны энергетическим сырьем должны быть увязаны с кадровой обеспеченностью отрасли совместными усилиями образовательных организаций высшего образования, академических, отраслевых институтов, недропользователей в системе подготовки специалистов геологов.

Новые образовательные программы высшего образования по прикладной геологии, составленные на основании федерального государственного стандарта высшего образования – специалитет по специальности 21.05.02 Прикладная геология, основанные на принципе сопряженности квалификационных требований работников геологической отрасли с компетенциями выпускников вузов преследуют цель развития понимания значения прикладной геологии для применения навыков геологического изучения недр и оценки минерально-сырьевой базы страны на перспективу до 2035 года.

Литература

1. Верчеба А. А., Игнатов П. А., Пилипенко Г. Н. О подготовке геологов для урановой отрасли в Российском государственном геологоразведочном университете. Материалы по геологии, поискам и разведке месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. Информационный сборник. Вып. 159. – Москва, 2015. – С. 16–18.
2. Верчеба А. А., Рихванов Л. П., Язиков Е. Г. Урановая геология и её кадровый потенциал. Материалы Четвертого международного симпозиума «Уран: геология, ресурсы, производство» 28–30 ноября 2017 г. – М.: ФГБУ «ВИМС», 2017. – 121 с. ISBN 978-5-9500949-6-5. – С. 18–20.
3. Геология будущего. Геологическая отрасль Российской Федерации к началу 2050-х годов. Информационно-аналитические материалы. – М.: АО «Росгеология», 2017. – 84 с.

4. Итоги работы федерального агентства по недропользованию в 2019 году. // Информационно-аналитические материалы. – М.: Минприроды, 2020. – 56 с.
5. Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22 12. 2018 г. – № 2914-р.
6. Тарханов А. В., Бугриева Е. П. Значимость и перспективы геолого-промышленных типов урановых месторождений. – М.: ВИМС, 2017. – 106 с.
7. Уран: геология, добыча, экономика. // Живов В. Л., Бойцов А. В., Шумилин М. В. – М.: РИС ВИМС, 2012. – 304 с.
8. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования - специалитет по специальности 21.05.02 Прикладная геология. (ФГОС ВО Прикладная геология-05). – М.: Минобрнауки РФ, 2020. – 18 с.

РАДИОАКТИВНОСТЬ И РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В СРЕДЕ ОБИТАНИЯ ЧЕЛОВЕКА

ASSESSING URANIUM CONCENTRATION IN DRINKING WATER: CASE-STUDY IN PAVLODAR REGION, KAZAKHSTAN

S. Z. Arynova[1], L. P. Rikhvanov[2], A. I. Belyanovskaya[2]

[1]Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan, shinar_uzh@mail.ru
[2]Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, alexandra.belyanovskaya@outlook.com

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ УРАНА В ПИТЬЕВОЙ ВОДЕ: ИССЛЕДОВАНИЕ В ПАВЛОДАРСКОЙ ОБЛАСТИ, КАЗАХСТАН

Ш. Ж. Арынова[1], Л. П. Рихванов[2], А. И. Беляновская[2]

[1]Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан, shinar_uzh@mail.ru
[2]Томский политехнический университет, Томск, Россия, alexandra.belyanovskaya@outlook.com

This paper presents research results on uranium in drinking water in the territory of the Pavlodar region. Research data shows that uranium content in water is significantly higher than its maximum permissible concentration of 0.015 mg/dm^3 as stated in the acts, which Russia and the USA has approved by the PEL of 32 μg/l. Two out of five settlements where uranium concentration in water is at its peak suffer from anthropogenic impact. The results show that water in the northeastern part of the investigated area contains high uranium level due to geological and metallogenic peculiarities of the region.

Introduction. Use of poor-quality drinking water leads to deterioration of human health, thus decreases natural resistance of an organism, and causes early functional changes in various physiological systems. Thus, the body's response to environmental pollution manifested in the form of diseases of cardiovascular system, skin, digestive organs, miscarriage [4]. It has particularly strong impact on children health [3]. Many researchers have identified statistically significant links between drinking water quality and endocrine disorders, neoplasms, anemia, respiratory diseases, congenital anomalies in development of the circulatory system in the result of medical-geographical assessment [5, 11]. Paper examines other researches in the field of drinking water with uranium in Pavlodar region. Currently Kazakhstan is studying organoleptic properties of water, content of main macroions and microelements in water, radiation status of borehole waters, isotopes of radioactive elements more or less in detail, but there is not any research devoted to uranium in water and its toxic properties [9, 12].

Radioelement migration depends on the form of its content in natural waters. Thus, uranium dissolved in water is dangerous mostly because of its high chemical toxicity and to a lesser degree of its radiotoxicity [7]. Since uranium has toxic effect on kidneys, it is often called "kidney poison" [8]. Researches [2] have shown that there are organs that accumulate this radioelement, i. e. liver, heart, spleen, and lungs. Uranium tends to accumulate in trophic links of food chain and is therefore of particular danger to vital activity of living organisms. Level of uranium in water depends on its depth. Moreover, flow of uranium into the upper and lower layers is different. In the former case, precipitation and surface sources, altered by anthropogenic factors, can cause impact. In the latter case, uranium is spread from enclosing rocks. Besides uranium level in water depends on its mineralization, dissolved substances, permeability of rocks, and status of environment in general.

Methodology materials and methods

Research Territory Description. In hydrogeological terms Pavlodar region is located within the Irtysh artesian basin of the second order (II). The Irtysh artesian basin is a part of a large West Siberian basin of the first order (I). The rest of the region occupies the northern slopes of the Central Kazakhstan hillocky area (Kokshetau – Ekibastuz hydrogeological region of the second order (II)). Regional water resources consist of surface runoff from the River Irtysh, some smaller rivers, i. e. Shiderty, Olenta, Seleti and etc., and groundwater. Major operational reserves of fresh groundwater are concentrated to sediments of the cretaceous, to a lesser extent, to the complexes and horizons of the paleogene, neogene and quaternary ages of the Irtysh artesian basin [10].

Metallogenic zoning of uranium assumes that this territory is a potential uranium-bearing complex with both natural and anthropogenic objects. Natural objects include iron-titanium-zirconium deposits that border some regions (Akmolinskaya) with various ore occurrences and brown coal basins, which make a radioecological hazard. In addition, part of the territory is represented by a mountain system with access to the surface of bedrock (granites, granosyenites). High concentrations of radionuclides are often confined to saline lake deeps (Karasor, Zhamantuz). Anthropogenic objects with high radioactivity include former long-term active Semipalatinsk nuclear test site, 39 % of which belongs to Pavlodar region. Research about uranium level in drinking water

of Pavlodar was included the following districts: Irtyshsky, Aksusky, Aktogajsky, Pavlodarsky, Zhelezinsky, Lebjazhensky, Bajanaul'sky, Majsky, Jekibastuzsky, Uspensky, Shherbaktinsky (figure 1). Study involved not only rural but urban territories as well, i.e. Pavlodar City and Aksu City.

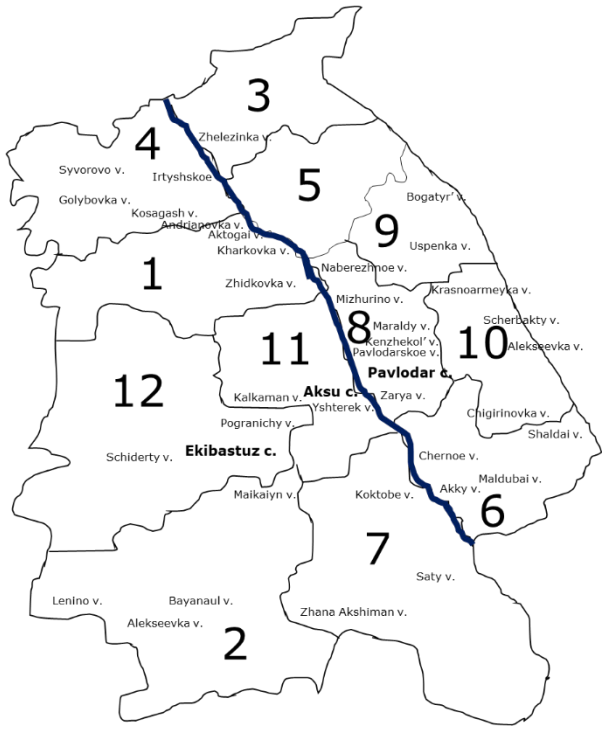


Figure 1. Drinking water sampling map (Pavlodar region, Kazhakstan)

1. Aktogaysky district; 2. Bayanaulsky district; 3. Zhelezinsky district; 4. Irtyshsky district; 5. Terenkol district; 6. Akkulinsky (Lebyazhensky) district; 7. Maysky district; 8. Pavlodarsky district; 9. Uspensky district; 10. Shcherbakty district; 11. Aksu municipal government; 12 Ekibastuz municipal government

Number of factors has affected a choice of sampling points: climate, landscape, morphology, anthropogenic pollution sources, previous research and regulatory documents. The other important factor is fair distance from the territory of the former Semipalatinsk nuclear test site, which is on the border of three regions East Kazakhstan, Karaganda and Pavlodar. In addition to the main factors, we have tried to take sampling evenly on the area of Pavlodar region.

Sampling Method. Drinking water is sampled according to GOST R 51593-2000 [6]. In Pavlodar City drinking water was sampled mainly from the tap in well-maintained apartments by draining water for about 2–3 minutes. Since we have tried to determine uranium content in drinking water, sampling was kept in containers made of polymer materials that are allowed to contact with water. Before sampling, the containers were rinsed with water at least twice and filled to the top. Since it was not possible to transport water samples to the laboratory immediately, before closing the container with a plug, the upper layer of water was drained so that there was a layer of air under the plug and it was not wetted during transportation. In order to be able to examine the water for a month, the samples were canned with concentrated nitric acid at a rate of 7 cm^3 per 1 dm^3. Each sample volume is 0.5 liters; the number of samples is 20. Some people in Pavlodar live in the houses that use water from the columns along the streets. Number of samples is 8.

Aksu is a relatively small town. Its territory has been divided through «envelope» method. Water samples were taken both in the city center and on the outskirts. 6 samples were selected in total, two in well-maintained houses, and rest of the samples in columns. In Ekibastuz City, 5 samples of water were taken from both the apartments and from the columns. These three cities have a number of townships and together with them are known as city administrations of Pavlodar (41 samples), Aksu (10 samples), and Ekibastuz (12 samples).

In rural settlements drinking water was sampled from individual wells, stand-pipes or drill holes. The depth of the wells ranged from 6 to 20 meters. 95 % of the total number of water samples is from wells. The depth of the drill holes, which constitute a small number of water samples, was 200–600 m. 2 to 5 water samples were taken in outskirts and central parts of the villages, i. e. 6 to 14 samples in each district.

136 samples of drinking water were collected from 11 districts of Pavlodar region, during the month, delivered to the research laboratory for microelement analysis in International Innovation Research and Educational Center "Uranium Geology" of the Department of Geoecology and Geochemistry of Tomsk Polytechnic University and investigated on a spectrophotometer "Fluorate-02-2M" (Method M 01-15-2010). The filter fluorimeter "Fluorate-02-2M" is a device equipped with light filters, a cuvette, a standard sample and specific reagents. In our research we have used a 10 • 10 mm cuvette. Method of measuring intensity of delayed fluorescence of uranyl ions ($\lambda = 530$ nm) in the moment when it is excited by ultraviolet radiation is used to determine uranium concentration in solutions. To enhance luminescence, sodium polysilicate (pH 8.10) is added to the solution. The limits of the relative error of measurements with observations $n = 2$, i. e. 2 weighed quantities were analyzed from each sample of drinking water. Arithmetic mean value is resultant value of these two measurements. Have gotten results on uranium level in water, authors took additional water samples from places, where its uranium value significantly exceeded arithmetic average of the entire sample. However, additional sampling confirmed previous results.

Data Analysis and Discussion. Analytical data on uranium level in water is presented in Table 1.

It is possible to distinguish three groups of rural districts based on uranium level in drinking water. In the first group, metal level in water exceeds 20 μg/l. Pavlodarsky (51.4), Uspensky (36.8 μg/l) and Lebyazhensky

Table 1. Statistics of uranium distribution in drinking water (administrative districts of Pavlodar region, mkg/l)

Районы Districts	X ± SE min … max	σ	Me	Mo	V, %
Pavlodar municipal government	51.4 ± 22.2 4.6 … 327.5	82.9	28.9	n/d	161.4
Uspenskydistrict	36.8 ± 11.9 24.9 … 48.7	16.8	36.8	n/d	45.7
Lebyazhensky district	22.7 ± 11 4.1 … 106.7	33.02	8.2	n/d	145
Aksu municipal government	12.9 ± 1.2 9.5 … 14.7	2.3	13.7	n/d	18
Maysky district	12.1 ± 2.4 3.1 … 25.2	8.1	11.8	n/d	67
Ekibastuz municipal government	11.8 ± 1 6.6 … 16.1	3.5	12.4	15.1	30
Aktogaysky district	11.5 ± 1.1 7.1 … 14.8	2.9	11.8	n/d	25
Bayanaulskydistrict	10.4 ± 1.2 4.8 … 20.5	4.4	9.5	n/d	42
Irtyshsky district	10.3 ± 1.3 0.4 … 31.9	10.7	6.6	n/d	104
Shcherbakty district	8.1 ± 2.4 0.4 … 24.2	7.8	5.3	n/d	96
Zhelezinsky district	7.7 ± 0.9 6.3 … 12	2.2	7	n/d	28
Total	**17.7 ± 3.4** **0.4 … 327.5**	**34.8**	**10.9**	**6.6**	**196**

X – arithmetic mean, SE – standard error, σ – standard deviation, Me – median, Mo – mode, Min – minimum, Max – maximum, V – coefficient of variation; n/d – no data.

(22.7 μg/l) districts belong to this group. Uranium level in water in the second group, the most numerous one, is around 10–20 μg/l. In the third group of districts, element level is less than 10 μg/l. The lowest level in drinking water is noticed in Zhelezinsky district (7.7 μg/l). Taking into account standard deviation and arithmetic mean, we calculated coefficient of variation, which varies widely from 25 to 276. Then we divided districts according to this indicator into three groups: 1). V to 50 % – Uspensky, Ekibastuzsky, Aktogaysky, Aksusky, Zhelezinsky, Bayanaulsky; 2) V from 50 to 100 % – Shcherbakty, Maysky; 3) V more than 100 % – Irtyshsky, Pavlodarsky, Lebyazhensky districts. Most of the districts belong to the group with V value till 50 %, which, despite anomalous concentrations of the element in drinking water, indicates its homogeneous distribution in the research territory.

Laser-luminescent analysis has shown that average concentration of uranium in water of settlements is 17.7 μg/l for 135 samples with a range from 7.7 to 51.4. These high indicators exceed maximum permissible concentrations in Russia (0.015 mg/dm^3) and USA (0.032 mg/dm^3) (figure 2). It means that when uranium level in water is 17.7 μg/l, its average concentration in scale is between 30–40 mg/kg. Maximum uranium level in water of Pavlodar region is in Naberezhnoye village (436.2 mg/kg).

Thus, we determined areas with high uranium level in water, which are mainly located on the right bank of Pavlodar region. It was mentioned above that we deter-

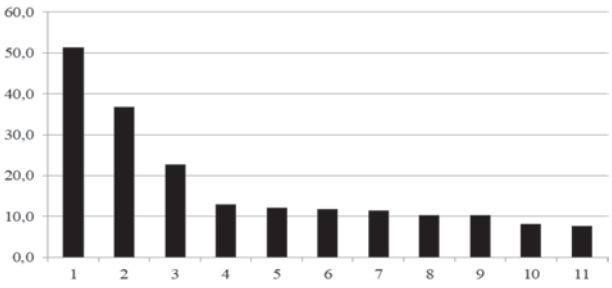


Figure 2. Distribution of rural districts of Pavlodar region in terms of uranium level in drinking water

Abscissa axis: settlements (1 – Pavlodar municipal government, 2 – Uspensky district, 3 – Lebyazhensky district, 4 – Aksu municipal government, 5 – Maysky district, 6 – Ekibastuz municipal government, 7 – Aktogaysky district, 8 – Bayanaulsky district, 9 – Irtyshsky district, 10 – Shcherbakty district, 11 – Zhelezinsky district); ordinate axis: value, μg/l.

mined uranium level in drinking water not only in villages, but also within the boundaries of cities, in which it turned out to be significantly less high, i. e. 7.4 times than in Pavlodar city, 2.7 times than in Aksu city. Drinking water in settlements is supplied through centralized sources (water intakes), and in private sectors through wells and drill holes. Primary entry of the element into water in private sectors depends on geological and metallogenic features of the territory, which is not the same for urban areas. It should be noted that cities are supplied from surface water source, i. e. the main River Irtysh, and in Aksu, uranium excess is higher 2 times. Comparison of analytical data with literature sources showed that in Pavlodar region uranium level in drinking water (17.7 μg/l) is 3 times higher than in the River Tuim (Khakassia) and 23.3 times than in basins of Tomsk Rivers. The smallest uranium level is observed in the water of the eastern slope of the Kuznetsk Alatau (0.38 μg/l). At the same time, uranium level in water of the south of Western Siberia is associated with enclosing rocks [1].

Conclusion. Quality of drinking water is factored by a set of indicators. This paper analyzes geochemical features of uranium, nature of its distribution, connection with its formations and degree of impact on human health. Research results conclude that more thorough further research on uranium in Pavlodar region shall take place, as it is not only a sign of drinking water quality, but ecological and geochemical status in general, as well as possible deposits and ore occurrences.

References

1. Arbuzov S. I. Geochemistry of radioactive elements: a textbook / S. I. Arbuzov. – Tomsk: TPU, 2009. – 300 p.
2. Baranovskaya N. V. Uranium and thorium in human organs and tissues / Baranovskaya N. V., T. N. Ignatova, L. P. Rikvanov // Bulletin of Tomsk State University, 2010. – № 339–182. – P. 188.
3. Beinner M. A. Effect of iron-fortified drinking water of daycare facilities on the hemoglobin status of young children / M. A. Beinner, J. A. Lamounier, C. Tomaz // Journal of the American College Nutrition, 2005. – V. 24. – № 2. – P. 107–114.
4. Catling L. A. A systematic review of analytical observational studies investigating the association between cardiovascular disease and drinking water hardness / L. A. Catling, I. Abubakar, P. R. Swift // Journal Water Health, 2008. – V. 6. – № 4. – P. 433–442.
5. Giri S. Risk assessment (chemical and radiological) due to intake of uranium through the ingestion of drinking water around two proposed uranium mining areas, Jharkhand, India / S. Giri, V. N. Jha // Radioprotection, 2012. – V. 47. – № 4. – P. 543–551.
6. GOST R 51593-2000. Drinking water. Sampling. – Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2000. – 8 p.
7. Hodgson A. Influence of Nephrotoxicity on Urinary Excretion of uranium / A. Hodgson, P.G.D. Pellow, G.N. Stradling. – Chilton: HPA, 2007. – P. 32.
8. Nephrology: a guide for doctors: in 2 tons / edited by S. I. Ryabov. – Saint-Petersburg: SpetsLiT, 2013. – P. 232.
9. Nuralieva U. Radiation status of borehole water in some Kazakhstani regions / U. Nuralieva, M. Bahtin, A. Dzhakenova, N. Altaeva // KAZNMU news, 2011. – P. 1–4.
10. Shaimerdenov N. R. Water resources of Pavlodar region / Shaimerdenov N. R. – Pavlodar: NPF «ECO», 2002. – 13 p.
11. Tavqveem A. K. Trace elements in the drinking water and their possible health effects in Aligarh City, India / A. K. Tavqveem // Journal of Water Resource and Protection, 2011. – 3. – P. 522–530.
12. Zhanbekov H. N. Radiation-hygienic assessment of water quality in Syr Darya river / H. N. Zhanbekov, Zh. S. Mukataeva, Zh. A. Lahbaeva // Water: chemistry and ecology, 2012. – № 9. – P. 14–17.

RADIOACTIVE POTENTIALITY OF ALKALI FELDSPAR GRANITES OF HOMRET EL GERGAB AREA, EASTERN DESERT, EGYPT

Mohamed Ghoneim[1,2], Maher Dawoud[3], Abdelhalim S. Mahmoud[4], Hanaa El-Dokouny[3], Aleksey V. Nastavkin[1]

[1]Southern Federal University, Rostov on Don, Russian Federation
[2]Nuclear Materials Authority, P.O. Box 530 El Maadi, Cairo, Egypt
[3]Geology Department, Faculty of Science, Menufia University, Egypt
[4]Geology Department, Faculty of Science, Fayoum University, Egypt

In terms of natural radioactivity, it is well known, for instance, that igneous rocks of granitic composition are strongly enriched in Th and U (on an average 15 μg g^{-1} of Th and 5 μg g^{-1} of U), compared to rocks of basaltic or ultramafic composition (< 1 μg g^{-1} of U) .For that reason, higher radiation levels are associated with igneous rocks and lower levels with sedimentary rocks. There are exceptions, however, as some shales and phosphate

rocks have relatively high content of those radionuclides (Aboelkhair et. al., 2012; Ghoneim and Addel Gawad, 2019; ; Ghoneim et. al, 2020; Zoheir et al., 2019; Vlasov et al., , 2020; UNSCEAR report 2021; Ghoneim et al 2021).

The Arabian-Nubian Shield (ANS) is an exposure of Precambrian crystalline rocks on the flanks of the Red Sea. The crystalline rocks are mostly Neoproterozoic in age. Geographically – and from north to south – the ANS includes the nations of Jordan, Egypt, Saudi Arabia, Sudan, Eritrea, Ethiopia, Yemen, and Somalia.The Eastern Desert of Egypt belongs to uranium, thorium, REE provinces in the Arabian Nubian Shield. (Ghoneim and Panova 2018). Gabal Homret Al Gergab area is delineated by Lat. 27° 44' – 27° 48' N, and Long. 33° 17' – 33° 22' 30" E. The study area is mainly occupied by the Pan-African basement rocks. It is mainly covered by alkali feldspar granite and Dokhan volcanics with some dyke swarms as well as Quaternary sediments (Fig. 1 a, b). The feldspar quarry occurs in Khalig Abu Had at the western margins of Gabal Homret El Gergab (Fig. 2a).

Due to increasing concern about environmental radiological protection, Measurements of natural radioactivity of ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K in Homret El Gergab area in north Eastern Desert of Egypt were carried out. The purpose of this study is to provide a radioactivity background levels in the investigated area environment and will be used as reference information to assess any changes in the radioactive background level due to geological processes. Representative granite rock samples from Homret El-Gegab north Eastern Desert of Egypt were collected for investigation. The samples were crushed, homogenized and were completely sealed for 4 weeks to reach secular equilibrium where the rate of decay of the daughters equals to that of the parent. This step is necessary to ensure that radon gas confined within the volume and the daughters will also remain in the sample. Radioactivity measurements were performed by gamma-ray spectrometer, employing a scintillation detector of 3 in. 3 in. It is a hermetically sealed assembly that includes NaI (Tl) crystal, photomultiplier tube, an internal magnetic light shield, an aluminium housing and a 14-pin connector coupled to PC –MCA Canberra Accuspes in Nuclear Materials Authority, Cairo, Egypt.

The highest average values of ^{226}Ra and ^{232}Th concentration are (6.4 ppt and 54 ppm respectively) whereas the highest average value of ^{40}K concentration is 6.8 %. The maximum value of ^{238}U is 28 ppm. These values are higher than recommended values.

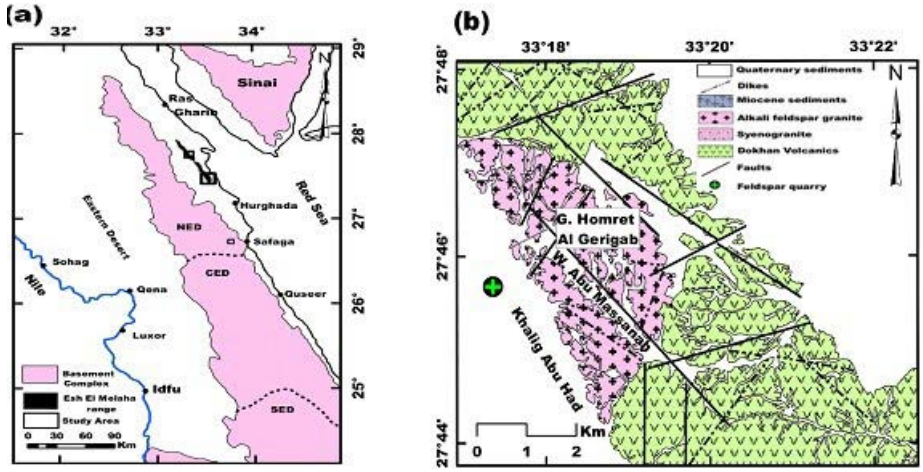


Figure 1. (a) Location map of Homret El Gergab area, North Eastern Desert, Egypt, (b) Geologic map of the study area (After Abd El-Hadi , 2013)

References

1. Basem Zoheir, Richard J Goldfarb, Astrid Holzheid, Ahmed El Sheikh Geochemical and geochronological characteristics of the Um Rus granite intrusion and associated gold deposit, Eastern Desert, Egypt, 2019, Geoscience Frontiers, DOI: 10.1016/j.gsf.2019.04.012.
2. Dmitry Yu. Vlasov, Elena G. Panova, Marina S. Zelenskaya, Oksana A. Rodina, Alexey D. Vlasov and Katerina V. 2020 Sazanova Changes of Granite Rapakivi under the Biofouling Influence.
3. Hatem Aboelkhair, Tarek Ibrahim, Ahmed Saad Gamma activity of stream sediment feldspars as ceramic raw materials and their environmental impact Radiation Protection Dosimetry, Volume 151, Issue 1, August 2012, Pages 175–182, https://doi.org/10.1093/rpd/ncr448.
4. Abd El-Hadi A. M., Mineralogical and geochemical prospection And radioelements distribution in Hamrat Al Jirjab stream sediments, Esh El Melaha

Range, North Eastern Desert, Egypt. A Thesis 2013, 251 p, Benha University, Faculty of Science,Geology Department.
5. Ghoneim M. M., Panova E. G., Abdel Gawad A. E. Natural radioactivity and geochemical aspects of radioactive mineralization in El Sela, South Eastern Desert, Egypt, International Journal of Environmental Analytical Chemistry (GEAC), https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1892665,. 2021.
6. Ghoneim M.M., Panova E. G., Abdel Gawad A. E., Yanson S. Y., 2020. Morphology and geochemical features of zircon from intrusive rocks of El Sela area, Eastern Desert, Egypt. News of the Ural State Mining University, doi.org/10.21440/2307-2091-2020-3-7-18.
7. Ghoneim M. M., Panova E. G. Migration forms of chemical elements in the intrusive rocks of the Eastern desert (El Sela area, Egypt). Journal of Mining Institute. 2018. Vol. 234, p. 573–580. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.573. 2.
8. Ghoneim M. M., Abdel Gawad A. E. Vein-type uranium mineralization in the Eastern Desert of Egypt // News of the Ural State Mining University, 2018. – Vol. 1 (49). – P. 33–38. DOI 10.21440/2307-2091-2018-1-33-38.
9. (UNSCEAR) Report Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2021.

RADIOACTIVE ELEMENTS IN COAL AND THEIR POSSIBLE IMPACTS

Robert B. Finkelman[1], Sergey Arbuzov[2]

[1]University of Texas at Dallas, USA, bobf@utdallas.edu
[2]Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, siarbuzov@mail.ru

Coal is notorious for containing virtually every element in the Periodic Table, some, such as uranium, can be present in extraordinarily high concentrations. For example, uranium in U.S. coal ash has been reported as high as 10 wt. % [9], Russia 7 wt. % [8], and in China up to 700 ppm in the coal [3]. In the USA, Russia, Kazakhstan, Mongolia, China, and other countries, numerous, predominantly small, uranium-coal deposits are known. In many of these deposits, hydrogeneous uranium anomalies are formed in the areas of interaction with the organic matter and ground water [1]. Uranium in coal has the distinction of having a positive economic impact as one of the few elements that has been profitably extracted from coal.

During the 1960s–1970s uranium was extracted from the low rank coals in the Northern Great Planes of the U.S. [4] where unregulated mining practices, such as burning the coal in place, resulted in mine-site contamination. Extraction of uranium from coal has also been reported from several regions of the former Soviet Union, China, and North Korea. Monnet et al. [7] report that by 1995 the US had produced more than 1000 tons of uranium from lignite, East Germany produced 3700 tons between 1947 and 1989 and two site in China were reported to produce uranium from coal.

Uranium in coal also has the reputation of having negative health impacts. Despite the low mean uranium content in the coals of the world (2.4 ppm) [5], the ash, forming during the combustion, is enriched with U in comparison with the mean U content in the upper continental crust by a factor of 6. In some cases its content in the ash and slag of the coals can reach commercially significant values. There have been cases when such wastes were used for the construction of living houses, industrial buildings and roads. Ash-slag disposal sites of modern power stations have from 2 to 3 times higher U contents than the mean U content in the coals of the world and higher Th-U ratio than the initial coal. This fact points to the leaching and loss of uranium in the process of ash-slag removing and the combustion waste disposal [2]. The influence of this leached uranium on ground and surface water is evident.

McBride, et al., [6] postulated that radioactivity emitted from coal combustion was greater that of nuclear power plants but offered no proof that it presented negative health impacts. Radioactivity from coal-burning power plants and coal combustion byproducts has been shown to generally be below acceptable health safety limits [11] (Fig. 1 and 2). Radon emitted from coal in poorly ventilated mines has been linked to lung cancer of the coal miner [10].

Other naturally occurring radioactive elements such as Th, K, Rn, Ra, etc. are present in coal in exceeding low levels. There are exceptions to these statements and high uranium coals and coal byproducts must be handled, and disposed of, with appropriate care. In short, radioactive elements in coal can have a positive economic impact and, if handled properly, the radioactive elements in coal and in coal byproducts should have little environmental and health impacts.

Acknowledgements: The research was carried out under the support of the grant of the Russian Science Foundation (Project No. 18-17-00004).

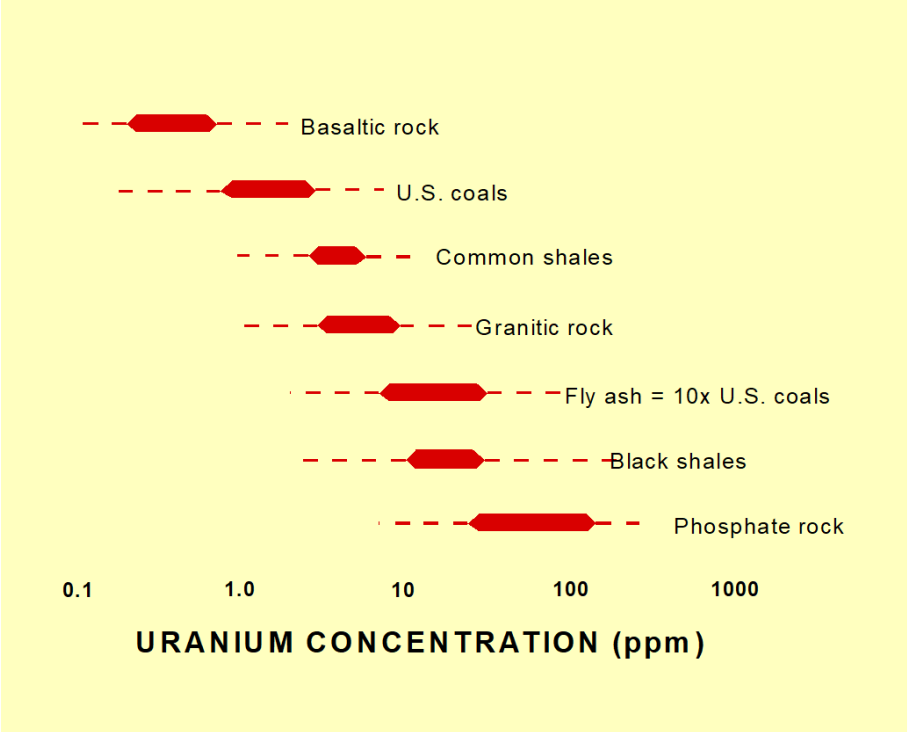


Figure 1. Uranium concentration ranges in U.S. coals, fly ash, and common rocks

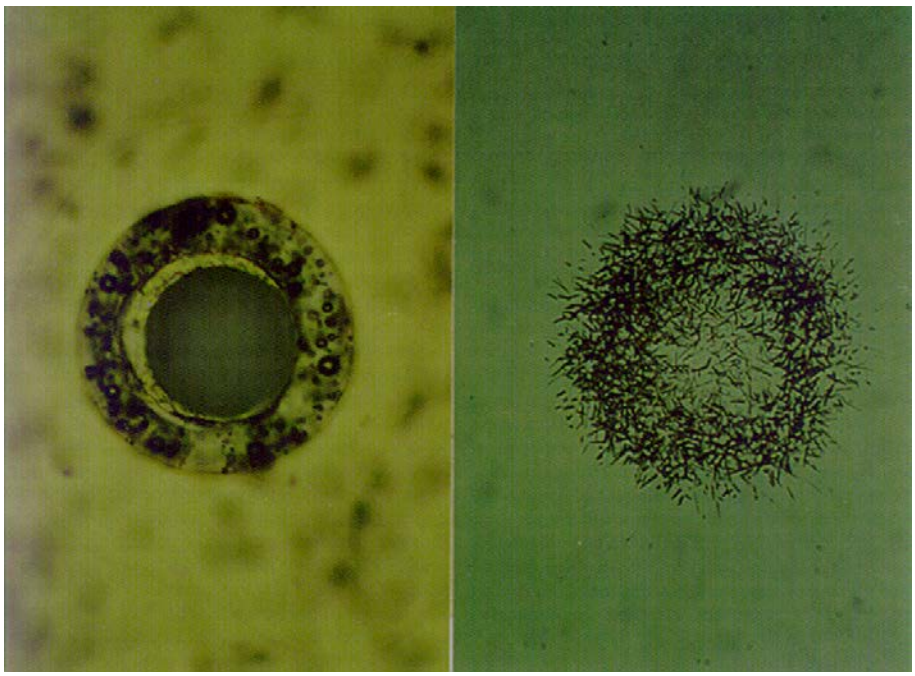


Figure 2. Left: Photograph of hollow glassy fly ash particle with a diameter of about 0.01 cm. Right: Fission track radiograph of the same particle illustrating that the uranium is uniformly distributed throughout the particle

References

1. Arbuzov S. I., Mashenkin V. S., Rihvanov L. P., 2008. Resource potential of uranium in the oxidation zones of coal deposits in Nothern Asia and percpectives of its exploration // Uran: resources and production. 2nd International Simposium. Moscow, FGUP VIMS, 26-28 November 2008. – P. 16.

2. Bykadorov V. S., Gavrilin K. V., Ozerskiy A. Yu. Kansk-Achinsk coal basin // Coal Resources of Russia Vol. III. Moscow, Geoinformmark, 2002. – P. 32–173.

3. Huang W., Finkelman R. B., Wan H., Zhang K., Tang X., and Zhao Z. The Distribution of Uranium in the Main Coalfields of China. // Energy Exploration and Exploitation, 2012. – V. 30, № 5. – P. 819–836.
4. Hurst F. J., 1981, Recovery of uranium from lignites. // Hydrometallurgy, 1981. – Vol. 7, № 4. – P. 265–287.
5. Ketris M. P., Yudovich Ya. E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals. // Int. J. of Coal Geology, 2009. – V. 78. – P. 135–148.
6. McBride J. P., Moore R. E., Witherspoon J. P., and Blanco R. E., Radiological impacts of airborne effluents of coal and nuclear plants. // Science, 1978. – V. 202, № 4372. – P. 1045–1050.
7. Monnet A., Percebos J., and Gabriel S., Assessing the potential production of uranium from coal-ash milling in the long run. // Resources Policy, 2015. – Vol. 45. – P. 173–182.
8. Seredin V. V. Metalliferous coals: formation conditions and outlooks for development. Coal Resources of Russia Vol. VI. Moscow, Geoinformmark, 2004. – P. 452–519.
9. Swaine D. J. The elements in coal. Butterworths, London, 1990. – 278 p.
10. Veiga L. H. S., Melo K., Koifman S., Amaral E. C. S. High radon exposure in a Brazilian underground coal mine. // Journal of Radiological Protection, 2004. – Vol. 24, № 3. – P. 295–305.
11. Zielinski R. A., and Finkelman R. B., 1997, Radioactive elements in coal and fly ash: abundance, forms, and environmental significance: U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-163-97, 1997. – 4 p. http://pubs.usgs.gov/fs/1997/fs163-97/.

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДОБЫЧИ УРАНА МЕТОДОМ СПВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ САМООЧИЩЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПРИМЕРЕ ДОБРОВОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА

Г. И. Авдонин[1], М. Д. Носков[2], Г. А. Тарханова[1], А. В. Сащенко[1]

[1]Всероссийский институт минерального сырья, ФГБУ «ВИМС»
Москва, Россия, gosha1956@mail.ru, sashchenko@vims-geo.ru
[2]Северский Технологический Институт
Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»
СТИ НИЯУ МИФИ
Северск, Россия, md_noskov@mail.ru

THE ENVIRONMENTAL SAFETY ASSESSMENT OF THE IN SITU LEACHING URANIUM MINING TECHNOLOGY IN TERMS OF THE GROUND WATER SELF-PURIFICATION POSSIBILITY ON THE EXAMPLE OF DOBROVOLNOYE URANIUM DEPOSIT

G. I. Avdonin[1], M. D. Noskov[2], G. A. Tarkhanova[1], A. V. Sashchenko[1]

[1]All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky
Moscow, Russia, gosha1956@mail.ru, sashchenko@vims-geo.ru
[2]Seversk Technological Institute – branch of State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Nuclear University «MEPhI», STI NRNU MEPhI
Seversk, Russia, md_noskov@mail.ru

The analysis of the possibility of self-purification of ground water after in situ leaching uranium mining on the example of the Dobrovolnoye uranium deposit is carried out. The possibility of a significant dilution of the main pollutants (sulfate- and nitrate-) due to the sorptive properties and acid consumption of host rock and the vital activity of bacteria thirty years after two-hole in situ leaching experiment has been established.

Введение

Добровольное месторождение относится к Зауральскому урановорудному району и расположено на территории Звериноголовского района Курганской области. Месторождение локализовано в палеоаллювиальных отложениях средне-верхнеюрского возраста, выполняющих депрессионную эрозионную структуру (Убаганскую палеодолину) на глубинах 480–600 м от земной поверхности [1]. По классифи-

кации МАГАТЭ месторождение относится к базальному подтипу песчаникового геолого-промышленного типа. Урановое оруденение имеет инфильтрационно-эпигенетический генезис. Оруденение контролируется зоной окисления первично сероцветных песчано-глинистых отложений. Особенностью месторождения является то, что статический уровень пластовых вод находится выше земной поверхности (+ 48 м). Рудовмещающий водоносный горизонт бурением вскрыт на глубине 513,4–529,7 м, он гидравлически изолирован от выше- и нижезалегающих горизонтов. Балансовое урановое оруденение мощностью 5,8 м локализовано в серых и белесых гравийно-песчаных отложениях аллювиального генезиса коскольского горизонта средней юры ($J_{2-3}k$).

В период с 06.01.1989 по 23.09.1989 (продолжительность 260 суток) Тургайской партией № 89 Зеленогорской экспедиции в пределах месторождения был проведен двухскважинный натурный опыт по методике В. А. Грабовникова (ВИМС) с целью оценки возможности добычи урана методом СПВ и определения технологических параметров.

В связи с тем, что АО «Далур» планирует отработку месторождения Добровольное методом сернокислотного СПВ, которое сопровождается попаданием в подземные воды химических реагентов, а также веществ, образующихся в результате взаимодействия выщелачивающего раствора с рудовмещающей породой, в июне 2020 года была предпринята попытка оценки экологической безопасности добычи урана методом СПВ. Для этого была пройдена контрольная скважина 224 между нагнетательной (Т1) и откачной (Т2) скважинами, задействованными при проведении в 1989 г. двухскважинного натурного опыта.

Материалы и методы

В целях изучения состава, химических и технологических изменений свойств рудовмещающих пород и пластовых вод был задокументирован и отобран керн контрольной скважины Р-224. Отбор проб руды и водных вытяжек проводился из свежеподнятого керна, сразу после извлечения из колонковой трубы. Охарактеризован рудоносный интервал.

Минералого-аналитические исследования выполнены с применением традиционных и прецизионных методов. Также были проведены исследования на рентгеновском микроанализаторе (РСМА) JEOL JXA 8100, укомплектованном энергодисперсионной приставкой INCA (аналитик Киселёв А. А.) и на электронном растровом микроскопе (аналитик Ружицкий В. В.) для наиболее представительного образца с целью изучения химического состава, морфологии и детального характера распределения урановой минерализации.

С целью изучения влияния жизнедеятельности микроорганизмов на физико-химические свойства среды выполнены микробиологические исследования в Институте микробиологии им. С. Н. Виноградского РАН.

Результаты и их обсуждение

Руды месторождения представлены сероцветными песчано-глинистыми породами с заметным количеством обломочного органического вещества. Состав обломочного материала полевошпат-кварцевый с примесью мусковита, цемент глинистый, преимущественно каолинитовый, с гидрослюдистой примесью. Состав руд алюмосиликатный с низким содержанием сульфидов. Содержание урана в рудах по данным рентгеноструктурного анализа (РСА) варьирует от 0,00n до 1,2 %. На радиоаграфиях (экспозиция 4 и 35 суток) руды характеризуются пятнисто-точечным распределением радиоактивности, которая совпадает с крупными выделениями и стяжениями пирита. Сравнивались руды в контуре проведенного натурного опыта, то есть через 30 лет после воздействия кислоты, и руды за пределами контура, там, где воздействия кислоты не было. Основными формами пирита после воздействия кислоты являются крупные обособления (конкреции) и мельчайшая вкрапленность часто кубической формы, в то время как в породах, не подвергавшихся воздействию кислоты, присутствуют мелкие и крупные стяжения фрамбоэдральной и кубической формы.

При анализе элементного состава рудовмещающей толщи в контуре натурного опыта установлены два горизонта аномальных содержаний серы, железа, урана, а также коэффициента радиоактивного равновесия (КРР): 522,4–523,4 и 524,9–525,4 м. В данных интервалах значения КРР (Ra^{226}/U^{238}) составляет 0,54–0,66, что характеризует их, как зоны переотложения урана (рис. 1).

Среднее содержание серы в рудных породах составляет 0,34 % (рис. 1). В аномальном интервале содержание серы достигает 2,2 %, общего железа до 5,7 % (при ср. значении 1,3 %), что приводит к увеличению содержания пиритов до 16 %. Содержание урана увеличивается до 0,3 и 1,2 % (при ср. значении 0,004 %).

Крупная конкреция пирита в аномальном интервале имеет зональное строение: в центральной части наблюдается полная псевдоморфоза пирита по растительному остатку, которая к краевым частям сменяется зональными округлыми (фрамбоэдральными) пиритами. В пределах пирита в разных зонах наблюдается однотипный минерал урана, который по составу отвечает коффиниту с незначительной примесью оксида урана. Подобное распространение минералов урана внутри пирита наблюдается в неизмененных породах, что свидетельствует о том, что подобные крупные дисульфиды железа с урановой минерализацией остались не выщелоченными.

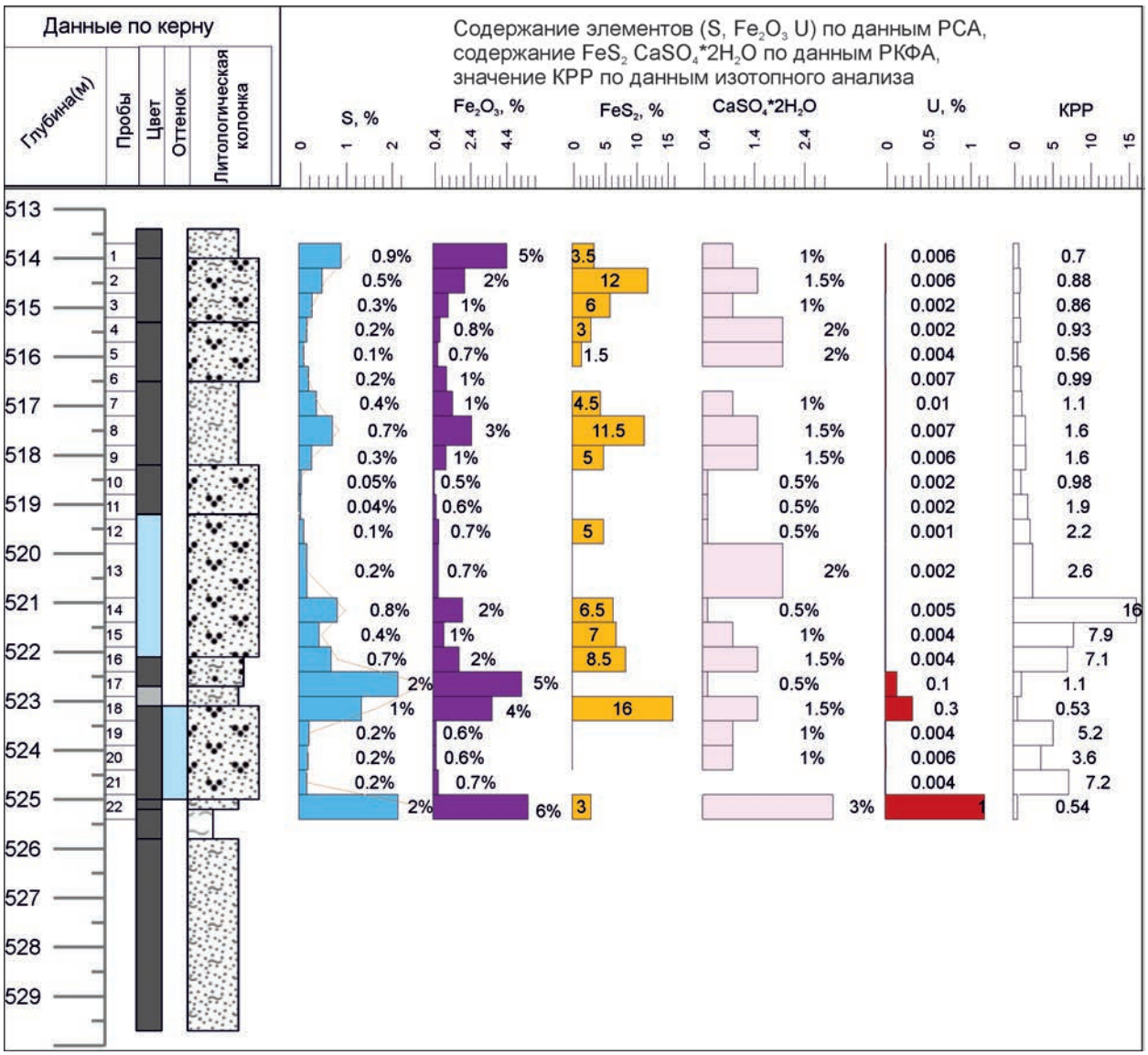


Рис. 1. Характеристика минерального и элементного состава скважины 224 на месторождении Добровольное

Таблица 1. Состав пластовых вод на месте проведения опыта ПВ-89

Объект исследования	pH	Содержания, г/л				Общая минерализация, г/л
		SO_4^{2-}	Cl^-	Na^+	Ca^{++}	
состав пласт. вод до опыта*	7,0	0,41	7,46	4,39	0,34	13,0
продуктивный раствор в конце опыта*	1,4	28,0	7,4	6,0	0,750	41,0
состав современных пласт. вод **	5,7	3,4 – 1,60	7,4	3,78	0,73	13,5

* – по данным отчета Тургайской партии № 89 «Зеленогорскгеологии»; ** – по данным ISP анализа водных вытяжек.

Крупные пиритовые образования окаймляются отложениями урановой минерализации, которые не наблюдались в неизмененных породах. На растровом электронном микроскопе отчетливо устанавливаются мелкие кристаллы пирита, иголочки гипса и пленки многокомпонетных урансодержащих гелей, что подтверждает новообразования после процесса выщелачивания.

Также в измененных породах по данным рентгенографического количественного фазового анализа (РКФА) фиксируется заметное количество гипса – от 0,5 до 3 %. В то же время содержание CaO уменьшилось в измененных породах до 0,29 %, относительно 0,79 % в неизмененных породах (по данным РСА).

Кроме того, проведен сравнительный анализ состава пластовых вод на месте проведения двухскважиного опыта до проведения эксперимента, на момент его завершения и на момент бурения контрольной скважины (июнь 2020 г). С момента окончания опыта pH растворов значительно увеличился от 1,4 до 5,7, что связано с нейтрализационной способностью рудовмещающих пород. По истечению 30 лет количество сульфат-ионов в пластовых водах в зависимости от проницаемости вмещающих пород уменьшилось с 28 до 3,4–1,6 г/л, что не на много превышает первоначальные значения, составляющие 0,41 г/л (Таблица 1). Аналогичная картина наблюдаются для ионов натрия. Содержание ионов кальция в водных вытяжках по истечении 30 лет осталось на уровне содержания в продуктивном растворе (0,7 г/л), что в два раза превышает содержание иона до начала опыта (0,34 г/л). Как видно из таблицы 1, за 30 лет с момента проведения двухскважинного опыта по выщелачиванию урана пластовые воды практически полностью восстановили свой состав.

Для определения сорбционных свойств и кислотоемкости были проведены опыты в трубчатой модели-колонке сероцветных песков, обладающих кислотоемкостью 5–8 кг/т при объемной массе 1,83 т/м^3. При подаче модельных растворов с содержанием серной кислоты до 5 г/л и содержанием урана 1–2 мг/л (pH 2,86) в колонку, установлено что нейтрализация сернокислотных растворов происходит до pH 4.

Сорбционная емкость алеврито-глинистой фракции для основных ионов загрязнителей составляет: для U^{4+} до 15 г/т, для Al^{3+} до 40 г/т. Так как содержание алеврито-глинистой фракции составляет порядка 20 %, то сорбционная емкость рудовмещающего горизонта в среднем составляет 3 г/т. Учитывая объемный вес рудовмещающих пород (1,83 т/м^3) и сорбционную емкость пород (3 г/т), получаем что 1 м^3 серых неизменённых проницаемых пород нейтрализует до 6 м^3 остаточных кислых растворов. Очищение растворов происходит практически на всю мощность продуктивного горизонта.

Микроорганизмы, в частности, сульфатредуцирующие, денитрифицирующие и водородобразующие бактерии способны очищать техногенные растворы от аллохтонных сульфат- и нитрит- ионов, а также создавать восстановительные условия для осаждения элементов с переменной валентностью [2].

Наличие в породах захороненного органического вещества является основным источником углерода и энергии для микроорганизмов. Возможными акцепторами электронов служат сульфат, присутствующий в пластовой воде, и нитрит, поступающий при выщелачивании урана. Поступление нитрита способствует созданию окисленной обстановки, препятствующей росту сульфатредуцирующих и других анаэробных бактерий.

Однако по мере удаления от зоны нагнетания в сторону разгрузки концентрация нитрита снижается за счет разбавления нагнетаемых растворов пластовой водой, а также в результате восстановления нитрита до молекулярного азота или аммония микроорганизмами, присутствующими в подземных горизонтах. При снижении концентрации нитрита может возобновляться рост сульфатредуцирующих бактерий. Образуемый ими сероводород приводит к восстановлению окисленных форм урана и их осаждению в виде сульфидов.

В керне скважины 224 не обнаружены анаэробные бродильные и сульфатредуцирующие бактерии. В образцах фиксируется достаточно большое количество денитрифицирующих и аэробных органотрофных бактерий. Это говорит о том, что при завершении работ с использованием нитрита для окисления урана, он будет восстановлен до элементарного азота микроорганизмами, существующими в пласте.

Заключение

По результатам минералогических исследований установлены две фазы урановой минерализации: минерализация во внутренней части пиритовых конкреций, которая, скорее всего, является остаточной формой; кайма урановой минерализации по внешней части пиритовых конкреций, возможно имеющая переотложенную природу. Также установлены новообразованные многокомпонетные урансодержащие гели в ассоциации с гипсом и пиритом.

Образцы пород на месте проведения двухскважинного опыта характеризуются низкой численностью микроорганизмов. Наиболее распространены аэробные органотрофные и денитрифицирующие бактерии. Процесс сульфатредукции возможен только после удаления нитратов из подземных вод и снижения окислительно-восстановительного потенциала среды. Восстановление сульфатов с образованием сероводорода может происходить на границе дисперсии нитратов при наличии органического вещества в подземных водах и приводить к восстановлению радионуклидов и снижению их миграции.

Пластовые воды на месте проведения сернокислотного двухскважинного опыта по выщелачиванию урана практически полностью очищены от сульфат- и нитрат-ионов, за счет действия денитрифицирующих, а затем сульфатредуцирующих бактерий.

Литература

1. Месторождения урана в речных палеодолинах Уральского региона. – М.: ВИМС, 2009. – 145 с.
2. Шугина Г. А. Использование сульфатредуцирующей микрофлоры при очистке остаточных сернокислотных растворов ПВ на пластово-инфильтрационных урановых месторождений / Г. А. Шугина, К. Г. Бровин, Е. М. Шмариович, В. Т. Дубинчук, Р. И. Гольдштейн, Б. И. Натальченко // Геология месторождений урана, редких и редкоземельных металлов, 1990. – № 125. – С. 123–135.

СОВРЕМЕННОЕ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И МЕХАНИЗМЫ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ «АТОМНОГО ОЗЕРА» НА СЕМИПАЛАТИНСКОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ ПОЛИГОНЕ

М. Р. Актаев, А. О. Айдарханов, С. Б. Субботин, Т. Ш. Токтаганов

Филиал Институт радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК
Курчатов, Казахстан, aktaev@nnc.kz

CURRENT RADIOECOLOGICAL STATE AND MECHANISMS OF RADIOACTIVE POLLUTION OF THE «ATOMIC LAKE» ON THE TERRITORY OF SEMIPALATINSK TEST SITE

M. R. Aktayev, A. O. Aidarkhanov, S. B. Subbotin, T. SH. Toktaganov

Branch Institute of Radiation Safety and Ecology NNC RK
Kurchatov, Kazakhstan, aktaev@nnc.kz

This paper provides findings of the present state of the lake reservoir, formed since the thermonuclear explosion was conducted and the reservoir formed. It was found that micro-macro components (ions and water impurities) and artificial radionuclides concentration are characterized by spatial distribution in the reservoir. In each case lowest values can be observed on the surface (down to 10 m) of the lake, the highest ones at the bottom (60–80 m). It was found that there takes place an established stable distribution nature of components under study at a depth starting with 20 m. Soils and lake bottom sediments are probable sources of radionuclide contamination. And a basic mechanism affecting radionuclide distribution is water layer stratification associated with the salt content.

Введение

Водоем «Атомное озеро» образовался в результате первого советского промышленного экскавационного взрыва, произведенного в январе 1965 г. с целью создания искусственного водохранилища в засушливых районах. Термоядерный взрыв мощностью 140 кт был проведен на испытательной площадке «Балапан», в месте слияния р. Шаган и р. Ащису (южная часть Семипалатинского испытательного полигона – СИП). В результате образовалась воронка глубиной около 100 м и диаметром 400 м.

Ранее проведенными (2010–2012 гг.) исследованиями был определен характер радионуклидного загрязнения прибрежных вод «Атомного озера». Особенностью полученных результатов являлось различие в содержании ^{3}H и ^{90}Sr на разных берегах озера. Изменение концентрации по ^{3}H составили от 100 до 1500 Бк/кг, по 90Sr от 1 до 3 Бк/кг. При этом, содержание ^{137}Cs и $^{239+240}$Pu составляли < 0,03 и < 0,002 Бк/кг [1, 2]. Основываясь на данных анализа прибрежных вод, было высказано предположение, что вероятными источниками формирования загрязнения вод, а так же причиной вариации содержания ^{3}H и ^{90}Sr в воде, являются процессы связанные с вымыванием радионуклидов из береговых грунтов и ее последующее перемешивание в водной среде [3]. Так, согласно имеющейся информации основное радионуклидное загрязнение сосредоточено в грунтах навала, образованного при экскавационном взрыве. Удельная активность техногенных радионуклидов в грунте навала, составляла в пределах 4000 Бк/кг по ^{241}Am, 15 000 Бк/кг по ^{137}Cs, 17 000 Бк/кг по $^{239+240}$Pu, 10 000 Бк/кг по ^{90}Sr, 20 000 Бк/кг по ^{152}Eu и 13 000 Бк/кг по ^{154}Eu [4, 5, 6]. Также, в качестве основного источ-

ника загрязнения вод, предполагалось наличие поступления загрязненных подземных вод из полостей боевых скважин площадки «Балапан».

Таким образом, радионуклидное загрязнение «Атомного озера», может быть связано с действием ряда факторов, таких как:

- вымывание радионуклидов с атмосферными выпадениями и сезонным изменением уровня воды;
- вымывание радионуклидов из донных отложений;
- поступление радионуклидов в результате питания подземными водами;

А механизмом перераспределения исследуемых компонентов могут быть процессы, связанные с перемешиванием водных масс за счет ветра, тепловой конвекции и поступления подземных вод.

Целью данной работы являлось получение более детальных химико-радиационных и гидрологических характеристик водной толщи, а также идентификация наиболее значимых факторов, определяющих характер распределения микро-, макрокомпонентов и искусственных радионуклидов.

Материалы и методы

Общая методология исследования заключалась в измерении температурного режима озера, пространственном отборе проб воды и их лабораторном анализе. Все работы по отбору проб воды из «Атомного озера» и измерение температуры проводились в летний, осенний и весенний периоды (июль, сентябрь, ноябрь, март). Определение содержания исследуемых компонентов проводилось в лабораторных условиях.

Результаты и их обсуждение

Проведенными исследованиями установлено, что содержание техногенных радионуклидов $^{239+240}$Pu, ^{241}Am и ^{137}Cs во всех точках исследования, отобранных как с поверхности, так и со дна озера, ниже минимально-детектируемой активности используемого аппаратурно-методического обеспечения и составили < 0,001 Бк/кг для $^{239+240}$Pu, < 3 Бк/кг для ^{241}Am и < 0,01 Бк/кг для ^{137}Cs.

Основное радионуклидное загрязнение озера сосредоточено в грунтах навала, образованного при экскавационном взрыве, и достигает значимых содержаний: 4000 Бк/кг по ^{241}Am, 15 000 Бк/кг по ^{137}Cs, 17 000 Бк/кг по $^{239+240}$Pu, 10 000 Бк/кг по ^{90}Sr, 20 000 Бк/кг по ^{152}Eu и 13 000 Бк/кг по ^{154}Eu. Однако, полученные результаты не подтвердили ожидаемых численных значений радионуклидов $^{239+240}$Pu, ^{241}Am и ^{137}Cs в воде озера. Это говорит об отсутствии их поступления из предполагаемых источников загрязнения водоема, путем выщелачивания из грунтов навала и донных отложений, а также привносом с подземными водами.

Из техногенных радионуклидов, в воде озера было обнаружено наличие ^{3}H и ^{90}Sr с активностью от 160 до 20000 Бк/кг и от 1 до 15 Бк/кг, соответственно. Во всех случаях минимальные значения радионуклидов наблюдаются в верхних частях озера в пределах 10–20 м, максимальные на глубинах 60–80 м.

Сезонные наблюдения показали стабильность распределений ^{3}H и ^{90}Sr по глубине озера с течением времени. За исключением верхнего слоя озера (до 20 м), где в период зимнего промерзания поверхности воды, концентрация ^{3}H увеличивается от 160 до 1000 Бк/кг. Наблюдаемое стабильность распределении ^{3}H и ^{90}Sr, показывает на отсутствие процессов водообмена озера на глубине ниже 20 м.

Установлено, что основным механизмом, влияющим на глубинное распределение и стабильность радионуклидов ^{3}H и ^{90}Sr, является стратификация водной толщи из-за растворенных химических соединений. Так как, значения минерализации между верхним и придонным слоем озера различаются в 2 раза, минимальные содержания составляют 10 г/л в приповерхностном слое воды до глубин 10–20 м, а максимальные величины в придонном слое воды с минерализацией в 20 г/л. В первую очередь, это способствует повышению плотности воды по мере понижения глубины, что приводит к застойному режиму озера.

Наблюдения за ^{90}Sr и Sr стабильным, между которыми обнаруживается тесная корреляция подтверждает их происхождение из одного источника, которыми вероятнее всего являются грунты навала и донные отложения озера, поскольку основное количество Sr стабильного в водные экосистемы поступает преимущественно из почвенных горизонтов в результате инфильтрации атмосферной влаги сквозь почво-грунты.

Результаты термометрии показали наличие зоны сезонного изменения температуры (термоклин) в «Атомном озере». Обнаруженная зона находится на глубине до 20 м, где в течение годового хода происходят процессы внешнего водообмена за счет тепловой конвекции и ветра перемешивания. Глубже этого горизонта, озеро не подвержено к циркуляциям воды за счет внешних физических процессов.

Заключение

Вода «Атомного озера» имеет сформировавшийся и устойчивый характер распределения компонентов на определенных глубинах в течение длительного периода времени. Вероятными источниками формирования ^{3}H и ^{90}Sr загрязнения, являются грунты и донные отложения озера. Основным механизмом, влияющим на перераспределение радионуклидов, является стратификация водной толщи из-за плотностной конвекции в водной толще, обусловленной изменениями температуры и солености воды.

Литература

1. Актаев М. Р. Характер загрязнения техногенными радионуклидами вод р. Шаган / Актаев М. Р., Айдарханов А. О., Лукашенко С. Н., Есимбеков А. Ж. // XII конф.-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов РГП НЯЦ РК, 15–17 мая 2013 г. – Курчатов: Институт атомной энергии.
2. Айдарханов А. О. Радиоактивное загрязнение вод реки Шаган (по результатам 2011-го года) / Айдарханов А. О., Лукашенко С. Н., Генова С. В., Ляхова О. Н., Айдарханова А. К. // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Выпуск 4. Том 1. Сборник трудов Национального Ядерного центра Республики Казахстан за 2011–2012 гг. / под рук. С. Н. Лукашенко. – Павлодар: ТОО «Дом печати», 2013. – С. 249–256.
3. Актаев М. Р. Мониторинг радиоактивного загрязнения вод р. Шаган / М. Р. Актаев, С. Н. Лукашенко, А. О. Айдарханов // Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы развития: тез. док. V Междунар. науч.-практическая конф., 12–14 сентября. – Павлодар: Дом печати, 2012. – С. 63–64. – ISBN 978-601-7112-63-9.
4. Заключительный технический отчет по проекту МНТЦ К-337 «Разработка основ и выбор технологий ликвидации поверхностного загрязнения и способов ограничения вторичного загрязнения территории Семипалатинского Испытательного Полигона», Институт ядерной физики Национального ядерного центра, Алматы, 2003.
5. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Выпуск 2. Сборник трудов Национального Ядерного центра Республики Казахстан за 2007–2009 гг. / под рук. С. Н. Лукашенко. – 12 с.
6. Ахметов М. А. Характеристика исходных данных радиационного состояния эпицентральной зоны объекта «Шаган»–экскавационного подземного ядерного взрыва для создания искусственного водохранилища / М. А. Ахметов, Е. М. Баядилов, С. Г. Смагулов, Г. С. Шуклин [и др.]. // Известия НАН РК. Сер. физико-математическая, 1994. – № 6.

РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (U, TH) В УГЛЯХ СЕВЕРНОЙ АЗИИ

С. И. Арбузов[1], С. С. Ильенок[1], И. Ю. Чекрыжов[2]

[1]Томский политехнический университет
Томск, Россия, siarbuzov@mail.ru
[2]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН
Владивосток, Россия, chekr2004@mail.ru

RADIOACTIVE ELEMENTS (U, TH) IN THE COALS OF NORTHERN ASIA

S. I. Arbuzov[1], S. S. Ilenok[1], I. Yu. Chekryzhov[2]

[1]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, siarbuzov@mail.ru
[2]Far East Geological Institute FEB RAS
Vladivostok, Russia, chekr2004@mail.ru

On the basis of unique author's data the characteristic of radiogeochemical features of coals of Northern Asia is given. Mean U and Th contents in the coals of separate deposits, basins and the whole region were assessed. The role of various factors in the accumulation of radioactive elements in the coals and peats was determined. The importance of various factors in the accumulation of U and Th in different periods of coal formation was estimated.

Являясь природным сорбентом и восстановителем, органическое вещество торфов и углей способно концентрировать многие металлы, в том числе и природные радионуклиды (U, Th и дочерние продукты их распада). В ряде случаев в углях формируются различные по масштабам месторождения урана. В начале «ядерной эры» ураноносные угли использовались в качестве промышленного сырья для извлечения урана. Однако в дальнейшем, в связи с выявлением более качественных сырьевых источников, интерес к ним иссяк и в настоящее время ураноносные угли рассматриваются лишь как потенциально опасный источник радиоактивного загрязнения окружающей среды. Усиление в начале 21 века общественного и государственного контроля за состоянием окружающей среды привело к ужесточению требований к экологической безопасности топливной энергетики. Мировая теплоэнергетическая промышленность, работающая на угле, ориентируется на угли, имеющие низкие содержания радиоактивных элементов. Од-

нако в процессе сжигания даже таких углей происходит концентрирование радиоактивных элементов в отходах сжигания – в шлаках и золах уноса. Так как поступление радиоактивных элементов в природную среду при работе ТЭС зависят в первую очередь от их содержания в топливе, очевидно, что прогнозирование загрязнения окружающей среды радионуклидами возможно только на основе объективных знаний об их концентрациях, закономерностях распределения и условиях накопления в исходном топливе (угольных пластах). Несмотря на очевидность проблемы, радиогеохимические и радиоэкологические исследования к настоящему времени выполнены лишь на весьма ограниченном числе разрабатываемых угольных бассейнов и месторождений, главным образом в ЕС, России, США и Китае.

В настоящей работе представлены новые данные по геохимии урана и тория в углях и торфах Сибири, Российского Дальнего Востока, Казахстана и Монголии и сделана попытка обобщения обширного материала по радиогеохимии углей региона. Общее число изученных проб угля в регионе составляет 4520 шт., торфа – 2157 шт., всего 6677 проб.

Методика исследований

Опробование угольных пластов выполнялось бороздовым методом с дифференцированным отбором проб на угледобывающих предприятиях, в естественных обнажениях, а также по керну поисковых и разведочных скважин. Длина интервала опробования выбиралась в зависимости от мощности и сложности строения пласта и изменялась в среднем от 0,15 до 2,0 м. В отдельных сечениях выполнялась детализация разреза с интервалом отбора проб 0,5–10 см. Изменчивость содержания по латерали оценивалась на основании сети разрезов по пласту.

Определение радиоактивных элементов (U и Th) в большинстве проб выполнено несколькими физическими недеструктивными методами непосредственно в угле. Непосредственно на угольных разрезах выполнено γ-спектрометрическое измерение U, Th и K с помощью стандартной полевой аппаратуры. Лабораторное определение U и Th производилось в Ядерно-геохимической лаборатории Национального исследовательского Томского политехнического университета (аналитик А. Ф. Судыко). Использовали как традиционный метод инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) из навески 100–200 мг, так и метод запаздывающих нейтронов (МЗН) из навески 5–10 г. Предел обнаружения U и Th в углях методом ИНАА равен 0,1 г/т. Предел обнаружения U МЗН – 0,01 г/т. Параллельно для ограниченного количества проб содержание U и Th изучено методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 7700x (Agilent Techn., США) в лаборатории аналитической химии Центра коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) (аналитик Н. В. Зарубина).

Оценка среднего содержания U и Th в углях и торфах выполнялась путем последовательного усреднения данных. Средние содержания U и Th в угольных пластах рассчитывались как средневзвешенные по мощности интервалов опробования, в месторождениях – как средневзвешенные по мощности пластов [9].

Содержание урана и тория в углях

Среднее содержание U в изученных углях Северной Азии изменяется от 0,4–0,5 г/т (Карагандинский и Торгайский бассейны, месторождение Каражыра, Казахстан) до 32,8 г/т (месторождение Адун-Чулун, Монголия) (табл. 1). В торфах Западной Сибири и полуострова Камчатка содержится 0,4 г/т U. Среднее содержание U в регионе в угле равно 2,3 г/т, в золе угля – 13,2 г/т. Эти цифры близки к средней оценке содержания U в углях мира [12]. Отмеченные в некоторых месторождениях повышенные содержания U связаны, в основном, с эпигенетическими процессами и имеют локальный характер.

Средние содержания Th в углях изменяются от 0,6 г/т в современных торфяниках Западной Сибири и полуострова Камчатка, 0,8 г/т в юрских и меловых углях Тунгусского бассейна до 8,1 г/т в углях Ургальского месторождений Дальнего Востока. Средняя оценка содержания Th для углей региона составляет 3,3 г/т. Рассчитанное региональное среднее содержание Th равно угольному кларку, но в связи с несколько повышенной расчетной средней зольностью углей среднее содержание Th в золе угля ниже зольного кларка. Характерно типичное для углей пониженное торий-урановое отношение, обусловленное селективным накоплением урана органическим веществом угля. Для изученных месторождений Дальнего Востока России отмечено более высокое среднее содержание Th и более высокое торий-урановое отношение, чем для Сибири (табл. 1).

Проведенные исследования показали, что угли разного возраста отличаются по радиогеохимическим характеристикам.

Угли девонского возраста. Характерной особенностью этого этапа углеобразования является высокое содержание в углях радиоактивных элементов. Причем если содержание тория незначительно превышает угольный кларк и может быть обусловлено высокой зольностью углей, то содержание урана значительно выше кларка.

Угли карбон-пермского возраста. Угленосные отложения этого возраста прослежены от западной Монголии на юге до Таймыра на севере и от Карагандинского бассейна Казахстана на западе до Тунгусского бассейна на востоке. Отличительная особенность позднепалеозойского угленакопления -

Таблица 1. Содержание урана и тория в углях и золах углей Северной Азии

Угольный бассейн, месторождение	Число проб	A^d, %	Содержание элементов, г/т				Th/U
			уголь		зола*		
			U	Th	U	Th	
1	2	3	4	5	6	7	8
Сибирский регион							
Угли девонского возраста							
Барзасское	14	32,5	3,2 ± 0,8	3,9 ± 0,4	9,8	12,0	1,2
Убрусское	6	49,2	27,2 ± 1,0	3,1 ± 1,0	55,3	6,3	0,1
среднее	**20**	**35,3**	**7,2 ± 0,8**	**3,8 ± 0,5**	**20,4**	**10,8**	**0,5**
Угли карбон-пермского возраста							
Горловский	24	7,0	1,0 ± 0,1	1,9 ± 0,2	14,3	27,1	1,9
Кузнецкий	1582	13,5	2,4 ± 0,2	3,3 ± 0,2	17,8	24,4	1,4
Минусинский	595	16,9	2,4 ± 0,3	3,0 ± 0,2	14,1	17,9	1,3
Тунгусский	67	14,2	2,7 ± 0,6	3,3 ± 0,7	19,0	23,2	1,2
Таймырский	41	22,1	2,0 ± 0,2	3,7 ± 0,3	9,0	16,7	1,8
Курайское	12	25,2	1,1 ± 0,2	4,2 ± 0,7	4,4	16,7	3,8
среднее	**2321**	**20,9**	**2,3 ± 0,3**	**3,1 ± 0,3**	**10,9**	**14,8**	**1,4**
Угли мезозойского возраста							
Пыжинское	6	6,5	0,95 ± 0,3	0,9 ± 0,4	14,6	13,8	0,9
Канско-Ачинский	524	9,8	3,2 ± 0,7	1,0 ± 0,2	32,7	10,2	0,3
Иркутский	186	14,5	2,7 ± 0,5	4,1 ± 1,0	18,5	28,5	1,5
Улугхемский	45	9,3	1,2 ± 0,4	1,2 ± 0,2	12,9	12,9	1,0
Западно-Сибирский	172	10,6	1,2 ± 0,1	2,4 ± 0,2	11,3	22,6	2,0
Тунгусский	30	12,6	2,1 ± 0,5	0,8 ± 0,2	16,7	6,3	0,4
Кузнецкий	3	17,3	2,1 ± 1,0	2,2 ± 0,5	12,1	12,7	1,0
Олонь-Шибирское	41	15,2	1,1 ± 0,1	4,1 ± 0,4	7,2	27,0	3,7
Татауровское	32	11,6	1,0 ± 0,2	0,9 ± 0,3	8,6	7,8	0,9
Тарбагатайское	34	10,9	2,6 ± 0,8	1,4 ± 0,6	23,9	12,8	0,5
Зашуланское	18	7,4	1,0 ± 0,6	1,1 ± 0,8	13,5	14,9	1,1
Харанорское	41	10,0	2,9 ± 1,0	1,4 ± 0,4	29	14	0,5
Загустайское	13	17,2	2,9 ± 0,6	5,3 ± 1,5	16,9	30,8	1,8
Буртуйское	18	9,5	2,5 ± 0,4	3,0 ± 0,5	26,3	31,6	1,2
Окино-Ключевское	8	17,9	1,1 ± 0,5	2,3 ± 0,4	6,1	12,8	2,1
Уртуйское	8	7,9	1,4 ± 0,2	1,5 ± 0,3	17,7	19,0	1,1
Апсатское	5	12,3	0,8 ± 0,1	2,5 ± 0,4	6,5	20,3	3,1
Среднее	**1183**	**11,8**	**1,8 ± 0,2**	**2,1 ± 0,3**	**15,3**	**18,0**	**1,2**
Угли палеогенового возраста							
Западно-Сибирский	73	30,7	4,6 ± 0,4	3,5 ± 0,2	15,0	11,4	0,8
Талду-Дюргунское	29	19,8	1,7 ± 0,7	1,1 ± 0,1	8,6	5,6	0,6
Среднее	**102**	**30,7**	**4,6 ± 0,4**	**3,5 ± 0,2**	**15,0**	**11,4**	**0,8**
Торф							
Западно-Сибирский	1958	7,3	0,4 ± 0,1	0,6 ± 0,1	5,1	8,5	1,7
Сибирская платформа	21	Н.д	5,2 ± 1,0	7,1 ± 1,8			
Среднее для Сибири	**5605**	**15,2**	**2,0 ± 0,2**	**2,4 ± 0,2**	**13,0**	**15,5**	**1,2**

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4	5	6	7	8
Российский Дальний Восток							
Угли позднеюрского – раннемелового возраста							
Ерковецкое	23	14,2	1,0 ± 0,4	3,6 ± 1,5	7,0	25,4	3,6
Райчихинское	19	13,6	1,5 ± 0,5	3,8 ± 1,8	11,0	27,9	2,5
Эльгинское	47	18,4	1,2 ± 0,1	3,7 ± 0,4	6,7	25,5	3,8
Ургальское	57	24,1	2,9 ± 0,3	8,1 ± 0,6	12,0	33,6	2,8
Липовецкое	4	39,5	2,1 ± 0,2	7,0 ± 0,8	5,3	17,7	3,3
Среднее	**150**	**22,0**	**1,7 ± 0,3**	**5,2 ± 1,0**	**7,9**	**23,9**	**3,0**
Угли палеоген-неогенового возраста							
Шкотовское	7	16,2	1,2 ± 0,3	2,7 ± 0,7	7,4	10,6	2,3
Павловское	51	15,3	3,7 ± 1,3	5,4 ± 1,6	24,1	34,9	1,4
Бикинское	16	17,4	1,3 ± 0,4	3,8 ± 0,9	7,6	22,0	2,9
Ушумунское	9	10,1	1,0 ± 0,2	2,4 ± 0,8	10,3	23,6	2,3
Яно-Омолойский	16	33,0	2,0 ± 0,4	3,2 ± 0,6	6,0	9,8	1,6
Сахалинский	148	14,2	0,7 ± 0,1	2,3 ± 0,3	5,0	15,7	3,1
Возновское	6	21,1	2,3 ± 0,6	5,4 ± 1,3	10,9	25,6	2,3
Сергеевское	7	15,8	1,2 ± 0,2	3,7 ± 0,9	7,6	23,4	3,0
Среднее	**260**	**17,8**	**1,7 ± 0,4**	**3,6 ± 0,3**	**9,7**	**20,1**	**2,1**
Торф							
Полуостров Камчатка	178	19,2	0,45 ± 0,05	0,64 ± 0,05	2,3	3,3	1,4
Среднее для Дальнего Востока	**588**	**19,4**	**1,7 ± 0,2**	**4,2 ± 0,5**	**8,8**	**21,7**	**2,4**
Казахстан							
Угли карбонового возраста							
Карагандинский	3	9,8	0,4 ± 0,1	1,1 ± 0,3	4,1	11,5	2,8
Экибастуз	41	36,1	1,1 ± 0,1	3,1 ± 0,3	3,0	8,6	2,8
Среднее	**44**	**23,0**	**0,8 ± 0,1**	**2,0 ± 0,2**	**3,4**	**9,2**	**2,5**
Угли юрского возраста							
Каражыра	7	11,7	0,5 ± 0,2	1,0 ± 0,2	4,3	8,5	2,0
Майкубенский	10	25,5	5,0 ± 2,2	3,6 ± 0,7	19,6	14,1	0,7
Торгайский	8	18,3	0,5 ± 0,1	0,75 ± 0,2	2,9	4,1	1,5
Шубарколь	69	6,1	1,3 ± 0,2	2,3 ± 0,4	21,8	38,0	1,7
Среднее	**94**	**14,4**	**2,2 ± 0,9**	**2,2 ± 0,4**	**15,3**	**15,3**	**1,0**
Монголия							
Угли карбонового возраста							
Нурс-Хотгор	122	18,2	2,1 ± 0,3	4,0 ± 0,4	11,6	22,0	1,9
Хаар-Тарвагатай	10	18,7	1,0 ± 0,1	2,7 ± 0,3	6,0	14,3	2,6
Хундлун	8	9,4	1,0 ± 0,1	2,6 ± 0,5	10,3	27,5	2,6
Зээгт	10	12,5	1,3 ± 0,4	2,1 ± 0,3	10,4	16,8	1,6
Среднее	**150**	**14,7**	**1,4 ± 0,3**	**3,1 ± 0,6**	**9,5**	**21,1**	**2,2**

Окончание таблицы 1.

1	2	3	4	5	6	7	8
Угли пермского возраста							
Таван-Толгой	11	9,8	2,6 ± 0,9	2,0 ± 0,3	26,5	20,4	0,8
Увур-Чулут	5	16,7	11,0 ± 2,0	4,9 ± 1,5	65,9	29,3	0,4
Маньт	16	20,2	3,3 ± 0,5	4,9 ± 0,5	16,3	24,3	1,5
Хуренгол	29	39,1	2,0 ± 0,2	6,3 ± 0,5	5,1	16,1	3,2
Среднее	**61**	**21,5**	**2,6 ± 0,4**	**4,5 ± 0,9**	**12,1**	**21,1**	**1,7**
Угли юрского возраста							
Сайхан-Ово	6	9,7	3,7 ± 1,3	2,2 ± 0,4	38,1	22,7	0,6
Могойн-Гол	15	20,8	21,8 ± 4,0	5,9 ± 1,7	105	28,4	0,3
Баянтэг	8	14,8	9,1 ± 3,6	7,2 ± 0,9	61,5	48,6	0,8
Шарынгол	29	12,2	2,1 ± 0,2	5,2 ± 0,4	17,2	42,6	2,5
Среднее	**58**	**14,4**	**5,0 ± 2,1**	**5,1 ± 1,1**	**34,6**	**35,7**	**1,0**
Угли раннемелового возраста							
Алаг-Того	10	28,6	3,0 ± 1,1	4,6 ± 0,7	10,5	16,1	1,5
Адун-Чулун	10	11,1	32,8 ± 5,5	1,0 ± 0,1	296	9,0	0,03
Баганур	4	8,4	3,7	1,6	44,0	19,0	0,4
Тугрикнуурское	7	13,3	0,7 ± 0,1	1,5 ± 0,2	5,3	11,3	2,1
Шиве Овоо	28	16,4	2,9 ± 0,5	4,2 ± 1,0			1,4
Увур-Чулуут	5	16,7	11,1 ± 2,0	4,9 ± 1,5	66,4	29,1	0,4
Чандгатал	12	14,3	5,3 ± 2,7	0,82 ± 0,3	37,2	5,8	0,2
Среднее	**76**	**15,0**	**10,1 ± 7,6**	**2,2 ± 0,8**	**103**	**22,3**	**0,2**
Среднее для Северной Азии	**6677**	**17,5**	**2,3 ± 0,2**	**3,3 ± 0,2**	**13,2**	**18,9**	**1,4**
Кларк для углей**	**8400**		**2,4**	**3,3**	**16**	**21**	**1,4**

Примечание: * – пересчитано на золу; ** – по [12].

широкое распространение в углях и углевмещающих породах продуктов вулканической деятельности, представленных измененными пепловыми туфамитонштейнами и рассеянным пирокластическим материалом [4]. Особенно отчетливо роль пеплопадов сказывается на геохимическом фоне Th [11]. Этим, вероятно, объясняется относительно выдержанное его содержание в позднепалеозойских углях на всей территории Сибири и Монголии, несмотря на большое разнообразие состава областей питания угольных бассейнов и месторождений. Только наиболее западные месторождения, расположенные на территории Казахстана, отличаются низкими содержаниями U и Th. В целом же пепловый материал доминирует в балансе Th в углях этого этапа угленакопления. Анализ опубликованных мировых данных позволяет заключить, что большое влияние вулканогенного вещества на формирование радиогеохимического фона позднепалеозойских углей является планетарной особенностью.

Угли мезозойского возраста. Мезозойский этап представлен несколькими возрастными уровнями угленакопления: триасовым, ранне-среднеюрским, позднеюрским и меловым. По масштабам проявления и ресурсам углей в регионе он превосходит позднепалеозойский этап угленакопления. Радиогеохимическая характеристика мезозойских углей в Сибирском регионе определяется, главным образом, особенностями состава пород областей питания районов угленакопления и ландшафтно-климатическими условиями формирования древних торфяников. Вулканизм, возможно имевший место в это время, не играл такой существенной роли в накоплении U и Th в мезозойских углях Сибири, как в углях палеозоя. Для углей Российского Дальнего Востока и Монголии, на территории которых проявление вулканической деятельности установлено от мезозоя до настоящего времени, роль пеплового материала существенно выше. В связи с этим, распределение U и Th в углях этих регионов достаточно неоднородно.

Среднее содержание U в мезозойских углях изменяется от 1,2 г/т в месторождении Эльгинское (Южно-Якутский бассейн) до 32,8 г/т в месторождении Адун-Чулун (Монголия). Значительный разброс

содержаний урана в углях характерен не только для отдельных месторождений, но и для отдельных частей месторождений или бассейнов.

В редких случаях в пластах устанавливаются сингенетичные урановые аномалии. При этом в отличие от Сибири для Российского Дальнего Востока и Монголии в накоплении радиоактивных элементов в мезозойских углях существенную роль играет вулканогенное веществ. На это указывают не только прямые факты наблюдения вулканогенного материала в угольных пластах (Эльгинское, Ургальское, Возновское и др. месторождения), но и повышенное торий-урановое отношение, а также высокие концентрации Th в золах углей отдельных месторождений, значительно превосходящие его содержания в углевмещающих породах.

Угли и торф кайнозойского возраста. Кайнозойский этап угле- и торфонакопления проявлен на исследуемой территории достаточно широко. Угли этого этапа отличаются низким качеством, высокой зольностью и крайне неоднородным распределением радиоактивных элементов. Содержание U и Th в изученных месторождениях изменяется в широких пределах: от 0,9 г/т в углях о.Сахалин до 3,9 г/т в углях Павловского месторождения Приморья. Месторождения, расположенные среди базитовых интрузивно-вулканогенных образований, как правило, бедны U и Th.

Вместе с тем, низкое торий-урановое отношение указывает на урановую геохимическую специализацию кайнозойской эпохи угленакопления в Сибири. С этим связано образование в палеогеновых углях значительных аномалий U, достигающих в отдельных случаях 300 г/т. С кайнозойским этапом связано обогащение U углей юрского и даже позднепалеозойского возраста. Особенно ярко эти процессы проявились в западной части Канско-Ачинского угольного бассейна (Итатское, Назаровское, Березовское, Козульское месторождения), в месторождениях Минголиии и Забайкалья.

Радиогеохимические характеристики углей кайнозоя Российского Дальнего Востока отличаются от сибирских. Влияние вулканогенно-гидротермальных процессов на формирования современного радиогеохимического облика углей Дальнего Востока обусловливает крайне неравномерный характер распределения в них U и Th. Наряду с низкорадиоактивными углями о. Сахалин здесь установлены и аномальные по содержанию U и Th угли. В отличие от палеогеновых углей Сибири, кайнозойские угли Дальнего Востока характеризуются в целом высоким торий-урановым отношением, что указывает на преимущественно сингенетичный кластогенный механизм поступления U и Th в угольный пласт. На этом фоне резко выделяются аномальные по содержанию урана германиеносные угли Приморья [8]. Они отличаются крайне неравномерным распределением U при довольно выдержанном содержании Th и имеют, по мнению авторов статьи [8], гидротермальную природу. Проведенные нами исследования U аномалий на Павловском месторождении указывают на гипергенную их природу.

Факторы, контролирующие накопление радиоактивных элементов в углях

Изученные угли Северной Азии характеризуются невысокими средними содержаниями U и Th, сопоставимыми с кларковыми содержаниями этих элементов в углях мира, но при этом неравномерным распределением. Выявлены угольные месторождения и бассейны, обогащенные и обедненные U и Th. В пределах бассейнов и месторождений повышенным содержанием радиоактивных элементов характеризуются отдельные угольные пласты или группы пластов. Причины таких различий кроются в разных условиях, существовавших на обширной территории угленакопления. Эти различия в определяются различными условиями их формирования, которые принято называть факторами накопления. К наиболее важным из них можно отнести ектонический фактор, фактор петрофонда, гидрогеохимический и фациальный факторы и фактор угольного метаморфизма.

Тектонический фактор

Геотектоническая обстановка наряду с климатическим фактором определяет скорость угленакопления, интенсивность процессов денудации в области сноса, характер и состав грунтовых и поверхностных вод. В целом для углей доминирующим фактором была поставка U и особенно Th с терригенной золой, поэтому при прочих равных условиях, более зольные угли содержат и больше U и Th. Роль терригенной золы в накоплении U и, особенно, Th отчетливо видна для всех регионов. Этот фактор повсеместно подтверждается наличием положительной корреляции между содержанием Th и зольностью. Для U в силу особенностей его геохимии, этот фактор выражен менее ярко, но также является значимым. Тектонический фактор накопления радиоактивных элементов в углях играет особенно существенную роль в сочетании с фактором петрофонда.

Фактор петрофонда

Под петрофондом за мы понимаем всю совокупность пород области питания бассейна угленакопления. Влияние состава пород области питания на формирование геохимического фона угольных бассейнов и месторождений может быть выражено в особенностях геохимической специализации углей и в закономерном изменении содержания элементов-примесей от краевых частей бассейна седиментации к центру. В настоящее время важная роль фактора петрофонда в накоплении элементов-примесей в углях

принимается как аксиома. Состав пород в обрамлении угленосных впадин, по-видимому, был главным фактором сингенетичного накопления U и Th в углях.

Фактор петрофонда ярко проявлен для протяженного Канско-Ачинского бассейна. Многочисленные эпигенетические аномалии в углях бассейна отчетливо приурочены к блокам горных пород, насыщенным кислыми и щелочными эффузивами, гранитоидами, месторождениями и проявлениями урана. С этим связана приуроченность аномалий к Кузнецко-Алалтаусской зоне в западной части бассейна и к Ангаро-Канской глыбе на востоке.

Высокая урановость юрских и меловых углей Монголии тесно увязана с широким развитием в регионе радиогеохимически специализированных интрузивно-вулканогенных комплексов [6, 7].

Фактор синхронного вулканизма

Наличие вулканогенного материала в карбоновых и пермских угленосных отложениях Кузнецкого, Тунгусского и Минусинского бассейнов отмечено многими исследователями [1, 3, 4].

При формировании тонштейнов в результате болотного выветривания пеплового материала, освобожденные элементы-примеси (в том числе – U и Th) могли поглощаться прилежащими слоями торфа. Такой процесс был особенно эффективен, если исходная пирокластика имела кислый и щелочной состав, что можно наблюдать на примере угольных пластов Иркутского, Минусинского и Кузнецкого бассейнов, группы пластов Ургальского, Раковского и Возновского месторождений Дальнего Востока, сверхмощного пласта месторождения Нурс-Хотгор в Монголии и других.

Проведенные исследования показали, что фактор синхронного вулканизма проявился на всей территории Северной Азии. Для западных областей велика роль карбон-пермского вулканизма в накоплении U и Th в углях. К востоку отмечается омоложение пирокластики от юрского возраста для Прибайкалья, Забайкалья, Якутии и центральной Монголии до палеоген-неогенового и четвертичного для Приморья, Сахалина и северо-востока России

Гидрогеохимический фактор

Гидрогеохимические условия определяли характер водно-минерального питания палеоторфяников. Его роль хорошо видна при сопоставлении средних содержаний U и Th в современных верховых и низинных торфяниках. Верховые торфяники, водно-минеральное питание которых осуществляется, в основном, за счет атмосферных выпадений, существенно беднее радиоактивными элементами, чем низинные.

Фактор угольного метаморфизма

Пока нет убедительных фактов, надежно доказывающих вынос или привнос радиоактивных элементов при метаморфизме угля. Тем не менее, ориентируясь на оценки кларков U в бурых и каменных углях [12], а также сопоставляя содержание U и Th в каменных углях и антрацитах конкретных бассейнов [2], можно предположить, что процессы угольного метаморфизма ведут к потере органическим веществом угля радиоактивных элементов.

Сопоставление различных данных по содержанию U и Th в углях разных стадий углефикации показывает, что из углей даже при сравнении крайних членов изученного метаморфического ряда выносится не более 50 % урана [11]. Торий при угольном метаморфизме явных тенденций к выносу не обнаруживает. Это подтверждается, в частности, и ростом торий-уранового отношения от бурых к каменным углям (табл. 1).

Гипергенное окисление углей

Гипергенное окисление углей часто обусловливает накопление в них U. Высокая сорбционная способность органического вещества угля по отношению к U обеспечивает его концентрирование из грунтовых вод даже с рядовым содержанием металла. Особенно благоприятны для этого процесса условия семиаридного климата с повышенным содержание в воде урана и кислорода. В результате в зоне окисления формируются ореолы обогащения U. Размеры этих зон накопления, как правило, невелики по сравнению с масштабами угольных бассейнов и не способны существенно повлиять на оценку геохимического фона угленосных отложений. Однако в пределах отдельных месторождений это влияние может быть значительно. Так, повышенное содержание U в месторождениях Адун-Чулун, Баянтег, Могойн-Гол (Монголия) обусловлено именно эпигенетическим его накоплением вплоть до промышленно значимых концентраций. Существенно обогащены им окисленные угли отдельных месторождений Дальнего Востока и Сибири. В Канско-Ачинском бассейне 5% ресурсов угля составляют окисленные угли, содержащие в отдельных случаях до 0,2 % U [5]. Обычно обогащается ураном верхняя часть пласта. Максимум содержания приурочен к фронту зоны окисления. При этом вся зона окисления характеризуется аномальным его содержанием. Этот факт указывает на сопоставимую роль сорбционного и окислительно-восстановительного геохимических барьеров в накоплении урана в окисленных углях.

Выводы

Угли Северной Азии в целом характеризуются низкими уровнями накопления урана и тория. Среднее содержание урана и тория в них соответствует угольному кларку.

Распределение U и Th в угольных бассейнах неравномерно и определяется совокупным влиянием целого ряда факторов: неоднородностью состава пород складчатого обрамления бассейнов, разницей фациальных условий угленакопления, влиянием вулканизма, климатических обстановок угленакопления и степенью метаморфизма углей.

Повышенные концентрации U и Th в углях тяготеют к обогащенным U и Th блокам пород в обрамлении бассейна, либо связаны с проявлением вулканизма в период угленакопления. Сочетание условий, характеризующихся наличием в обрамлении угленосной структуры радиогеохимически специализированных комплексов, подвергавшихся выветриванию в гумидном климате, с вулканической активностью в период угленакопления, обусловило формирование геохимических аномалий U и Th в отдельных угольных пластах и месторождениях региона.

Аномальные содержания U в основном, имеют эпигенетическую природу и связаны с поступлением в угольный пласт кислородных урароносных вод. Они обуславливают окисление угля и накопление в нем высоких концентраций урана. Для этих условий наиболее благоприятны районы с повышенным радиогеохимическим фоном и умеренно аридным климатом. В этих условиях формируются обогащенные ураном кислородные воды, благоприятствующие накоплению аномальных концентраций U на органическом веществе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-17-00004).

Литература

1. Адмакин Л. А. Типы тонштейнов в угольных пластах Минусинского бассейна // Литология и полезные ископаемые, 1992. – № 2. – С. 49–56.
2. Арбузов С. И., Ершов В. В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: Изд. дом «Д-Принт», 2007. – 468 с.
3. Ван А. В. Роль пирокластического материала в угленосных отложениях Кузнецкого бассейна // Советская геология, 1968. – № 4. – С. 129–137.
4. Ван А. В. Вулканогенный пепел в угленосных отложениях верхнего палеозоя Средней Сибири // Литология и полезные ископаемые, 1972. – № 1. – С. 40–51.
5. Гаврилин К. В., Озерский А. Ю. Канско-Ачинский угольный бассейн. – М.: Недра, 1996, – 272 с.
6. Машенькин В. С., Арбузов С. И., Судыко А. Ф. Радиогеохимическая характеристика углей Монголии // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы III Международной конференции, г. Томск, 23–27 июня 2009 г. – Томск: STT, 2009. – С. 345–348.
7. Миронов Ю. Б. Уран Монголии. Второе издание. – Спб.: изд-во ООО «Анатолия», 2006. – 328 с.
8. Середин В. В., Данильчева Ю. А., Магазина Л. О., Широва И. Г. Германиеносные угли Лузановского грабена (Павловское буроугольное месторождение, Южное Приморье) // Литология и полезные ископаемые, 2006. – № 2. – С. 1–24.
9. Ткачев Ю. А., Юдович Я. Э. Статистическая обработка геохимических данных. Методы и проблемы. – Л.: Наука, 1975. – 233 с.
10. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Неорганическое вещество углей. – Екатеринбург: НИСО УрО РАН, 2002. – 420 с.
11. Arbuzov S. I., Volostnov A. V., Rikhvanov L. P., Mezhibor A. M., Ilenok S. S. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia) // Int. J. Coal Geol., 2011. – Vol. 86. – P. 318–328.
12. Ketris M. P., Yudovich Ya. E. Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals // Int. J. Coal. Geol., 2009. – Vol. 78. – № 2. – P. 135–148.

ОПЕРЕЖАЮЩИЕ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГРР НА УРАН И ДРУГИЕ ВИДЫ ТПИ, И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

П. С. Бабаянц, О. Р. Контарович, А. А. Трусов

АО «ГНПП «Аэрогеофизика»
Москва, Россия, bab@aerogeo.ru, agp@aerogeo.ru

ADVANCED AIRBORNE GEOPHYSICAL METHODS FOR URANIUM AND OTHER TYPES OF MINERALS EXPLORATION, DEVELOPMENTS OF MODERN AIRBORNE SURVEYS

P. S. Babayants, O. R. Kontarovich, A. A. Trusov

Aerogeophysica Inc
Moscow, Russia, bab@aerogeo.ru, agp@aerogeo.ru

Modern airborne geophysical technologies are one of the most dynamically developing branches in geological exploration. The paper discusses the features of their use in the search and evaluation of low-contrast deposits, including data interpretation technologies.

Введение

Целевым назначением геологоразведочных работ на поисковых площадях является выявление и оценка залежей, причем недропользователи заинтересованы с одной стороны – в снижении затрат на «непрофильные» поисково-оценочные исследования, а с другой – в получении максимального эффекта от их выполнения, для уменьшения стоимости горно-буровых работ и сокращения времени на их выполнение. Эффективным средством оптимизации геологоразведочных работ является выполнение опережающих аэрогеофизических исследований, качество исполнения и информативность которых в последние годы растет быстрыми темпами [1].

Характеристика объектов изучения

При том, что объекты изучения могут быть специализированы на абсолютно разные виды полезных ископаемых, имеется целый ряд общих черт, определяющих подходы к их геологическому изучению.

Прежде всего, размеры площадей под такие работы обычно невелики и редко достигают первых сотен квадратных километров, при этом параметры целевого объекта часто диктуют необходимость выполнения съемок повышенной детальности (1 : 10 000 и крупнее).

Основанием для выполнения работ на той или иной площади являются в первую очередь перспективы обнаружения промышленно значимых проявлений полезного ископаемого, установленные ранее. Таким образом, объектом изучения обычно является определенный промышленно-генетический тип оруденения, и, следовательно, факторы локализации целевого объекта в целом известны. Более того, в контуре площади часто имеются выявленные ранее пункты минерализации, рудопроявления, либо рудные пересечения, которые могут быть использованы как эталоны при последующих исследованиях.

В последние годы все чаще предметом изучения являются объекты, неконтрастно проявленные в физических полях. Так, значительная часть коренных месторождений урана характеризуются отсутствием четких физических границ – контуры месторождений определяются величиной бортового содержания, которая может изменяться в зависимости от конъюнктуры рынка. В этих условиях наиболее эффективным представляется подход, основанный на последовательном картировании разнородных факторов локализации оруденения [2].

Указанные особенности объектов изучения позволяют сформировать общие подходы к планированию и выполнению геофизических исследований.

Особенности применения современных аэрогеофизических технологий

Из изложенного следует, что для обеспечения геологоразведочных работ, направленных на поиски и оценку месторождений, необходимо выполнение геофизических съемок повышенной детальности, максимально полным комплексом методов.

Безусловно, в отдельных конкретных геолого-геофизических условиях может потребоваться выполнение наземных исследований вполне определенного состава. Однако в большинстве случаев использование современных аэрогеофизических технологий предпочтительнее, поскольку они:

• не уступают наземным аналогам по точности и пространственному разрешению;

• не сопровождаются техногенной нагрузкой на изучаемую территорию;

• требуют в разы меньше времени на выполнение;

• позволяют одновременно регистрировать целый комплекс параметров;

• значительно дешевле аналогичных наземных работ.

При планировании аэрогеофизических работ ключевыми вопросами являются выбор используемых методов и модификаций, определение элементов методики съемки и подбор оптимального авианосителя. Например, в случае, когда предметом локализации являются компактные контрастные залежи (например, сульфидные медно-никелевые руды, скарново-магнетитовые тела и др.) очевидна необходимость использования специальных модификаций аэрогеофизических методов, в первую очередь – импульсной аэроэлектроразведки, которая относится к числу традиционных аэрогеофизических методов и реализуется в вертолетном варианте.

При малых размерах исследуемых участков использование традиционных аэрогеофизических технологий может оказаться проблематичным, поскольку с одной стороны – малые размеры площади делают выполнение таких работ нерентабельным (за счет резкого возрастания удельного веса затрат на организацию и ликвидацию работ), а с другой стороны – с традиционными авианосителями практически невозможно обеспечить кондиционные съемки повышенной детальности (крупнее масштаба 1 : 5 000).

В этих случаях появляются дополнительные возможности, связанные с внедрением в практику аэрогеофизических съемок легких беспилотных носителей (БПЛА). Практические возможности использования БПЛА в настоящее время ограничиваются требованиями законодательства [4]. Указанные ограничения могут потребовать выполнения комплексных съемок за несколько облетов, для каждого из методов в отдельности, а также разработки специальных методических приемов выполнения съемки и новых аппаратурных решений.

Интерпретация данных

Эффективность опережающих аэрогеофизических работ определяется в равной мере как правильным выбором комплекса используемых методов и технологии выполнения съемок (сеть наблюдений, направление маршрутов, высота полета и способ облета территории, и т. п.), так и использованием наиболее адекватных подходов к интерпретации полученных материалов, с учетом особенностей геологического строения территории, а также объема и характера априорной геолого-геофизической информации.

При поисках и оценке объектов, контрастно проявленных в геофизических полях, ключевая роль должна отводиться методам локальной интерпретации данных, нацеленных в первую очередь на моделирование и количественную оценку изолированных геофизических аномалий. Подобного рода технологии активно разрабатываются как для потенциальных, так и для электромагнитных полей [1]. Очевидным также представляется вывод о целесообразности комплексирования альтернативных методов 3D-моделирования, а также использования всего спектра априорной геолого-геофизической информации для снижения неоднозначности интерпретации.

При изучении малоконтрастных объектов наиболее эффективным является использование двух дополняющих подходов: последовательное картирование прогнозных факторов локализации оруденения и применение вероятностных методов прогноза, основанных на реализации алгоритмов распознавания образов.

Заключение

Современные аэрогеофизические технологии являются эффективным средством оптимизации геологоразведочных работ, позволяя заметно сократить время на исследование территории и снизить общие затраты на выполнение работ, в первую очередь – за счет более точного позиционирования тяжелых горно-буровых работ.

При этом достижение желаемого эффекта возможно лишь при решении целого спектра задач, связанных с определением типа носителя и элементов методики съемки, выбором комплекса методов и технологий интерпретации данных. Перечисленные выше параметры могут быть определены исключительно на основе тщательного и всестороннего анализа данных об особенностях геологического строения территории, характере и свойствах целевого объекта, ландшафтно-географических условиях выполнения работ, с учетом размеров изучаемой площади.

Литература

1. Бабаянц П. С. Современные аэрогеофизические технологии при прогнозе, поисках и оценке месторождений твердых полезных ископаемых / Бабаянц П. С., Контарович О. Р., Трусов А. А. // М., Разведка и охрана недр, 2020. – № 11. – С. 30–40.

2. Калмыков Б. А. Возможности современных аэрогеофизических методов при прогнозировании и поисках золоторудных месторождений / Калмыков Б. А., Лёвин Ф. Д., Трусов А. А. // М., Золото и технологии, 2017. – № 2 (36). – С. 64–70.

3. Паршин А. В. Первые результаты методических работ по применению беспилотных аэрогеофизических технологий на стадии поисков месторождений урана / Паршин А. В., Гребенкин Н. А., Морозов В. А., Ржевская А. К., Шикаленко Ф. Н. // Разведка и охрана недр, 2017. – № 11. – С. 59–64.

4. Федеральные правила использования воздушного пространства Российской Федерации / М., Центрмаг. – Серия: Постановления правительства РФ, 2021. – 72 с.

АЭРОГЕОФИЗИКА НА СВЕРХЛЕГКИХ НОСИТЕЛЯХ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СЪЕМОК ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

П. С. Бабаянц, О. Р. Контарович, А. А. Трусов

АО «ГНПП «Аэрогеофизика»
Москва, Россия, bab@aerogeo.ru, agp@aerogeo.ru

AIRBORNE GEOPHYSICS ON ULTRALIGHT AIRCRAFTS AND UAV FOR HIGH-RESOLUTION SURVEYS

P. S. Babayants, O. R. Kontarovich, A. A. Trusov

Aerogeophysica Inc
Moscow, Russia, bab@aerogeo.ru, agp@aerogeo.ru

The paper discusses the advantages and features of using manned ultralight aircraft for airborne geophysical surveys in comparison with unmanned aerial vehicles.

Введение

Горнорудные компании и предприниматели, занятые в сырьевом бизнесе, постоянно сталкиваются с необходимостью оперативной оценки перспектив лицензированной территории с целью снижения объемов горно-буровых работ и одновременно – повышения их эффективности. При этом требования лицензионного соглашения обычно накладывают весьма жесткие временные ограничения на работы, направленные на геологическое изучение площади. В этой связи недропользователи вынуждены решать весьма сложную и противоречивую задачу в кратчайшие сроки обеспечить максимально надежную оценку перспектив территории, при этом (с учетом возможных рисков) с минимумом затрат. Эффективным средством оптимизации геологоразведочных работ являются опережающие аэрогеофизические исследования. Их эффективному использованию способствует развитие ускоренными темпами как аппаратурно-технической базы, так и технологий обработки и интерпретации данных [1].

В последние годы появились дополнительные возможности, связанные с внедрением в практику аэрогеофизических съемок легких беспилотных носителей (БПЛА). С помощью БПЛА можно выполнять съемки большей детальности и на меньших высотах. Важной особенностью беспилотных носителей является дешевизна, что делает их доступными широкому кругу потенциальных пользователей, однако такая доступность создает определенные риски, связанные с возможным включением в процесс получения и интерпретации геофизических данных лиц, не обладающих необходимой для этого квалификацией. Кроме того, возможности использования беспилотных носителей сужаются целым рядом ограничений как технического, так и юридического характера.

С учетом особенностей потенциальных объектов изучения, альтернативой БПЛА может стать использование появившихся в последние годы сверхлегких пилотируемых летательных аппаратов.

Особенности объектов изучения и требования к аэрогеофизическому комплексу

При выполнении детальных поисковых и поисково-оценочных работ размеры лицензионных площадей как правило невелики и составляют первые кв. км, в редких случаях – 10–20 кв. км. В этих условиях использование традиционной аэрогеофизики может оказаться экономически нецелесообразным, т. к. затраты времени и средств на организацию и ликвидацию работ будут заметно превышать затраты на собственно съемку. В этих условиях использование легких авианосителей можно рассматривать в качестве альтернативы, причем важным их преимуществом является высокая мобильность технологий и возможность базирования в непосредственной близости площади работ. В целом к числу особенностей объектов, типичных для изучения на лицензионных площадях, можно отнести:

• Как правило, относительно небольшие размеры (обычно от первых кв. км до первых десятков кв. км).

• Определенный промышленно-генетический тип оруденения, и, следовательно, внятные факторы его локализации.

• Наличие в контуре лицензии (или в непосредственной близости) эталонного объекта или рудных пересечений.

• Во многих случаях – отсутствие прямых признаков локализации целевого объекта, отражающихся в геофизических полях.

Совокупность перечисленных особенностей позволяет определить требования к комплексу опережающих геофизических исследований.

• Необходимость выполнения детальных (масштаба 1 : 10 000 и крупнее) съемок на малых высотах.

• Целесообразность во многих случаях использования легких носителей (беспилотных, либо сверхлегких пилотируемых).

• Привлечение максимально полного комплекса доступных аэрогеофизических методов, нацеленных как на картирование косвенных факторов контроля оруденения, так и на возможную локализацию отдельных залежей.

• Использование современных методов интерпретации, включая технологии физико-математического моделирования, корреляционного и регрессионного анализа, распознавания образов и т. п.

Особенности методики аэрогеофизических съемок

Из изложенного выше следует целесообразность использования для выполнения опережающих аэрогеофизических съемок легких авианосителей.

Главным и бесспорным преимуществом использования БПЛА является полное исключение риска гибели экипажа воздушного судна. Также весьма ценной можно считать возможность выполнения съемок повышенной детальности, недоступной для традиционной аэрогеофизики: в печати систематически появляется информация о выполнении съемок с использованием легких беспилотников масштаба 1 : 2 000 и крупнее, тогда как для традиционной аэрогеофизики пределом является 1 : 5 000.

Сейчас в мире используются аппаратурно-технические средства выполнения таких съемок со всеми видами беспилотных носителей (самолеты, вертолеты, мультироторные, рис. 1, [3]), но наиболее широко используются мультироторные системы. Однако практически единственным геофизическим методом, доведенным до возможности выполнения полноценных производственных съемок, является магнитометрия.

Для магнитных съемок в основном используются специально разрабатываемые облегченные датчики магнитного поля, как правило, квантовые. Однако есть примеры адаптации под съемки с БПЛА серийных образцов. На рис. 2 приводится пример беспилотнного комплекса на мультироторном носителе, разработанного под серийный датчик CS-3 (Scintrex).

С учетом технических особенностей БПЛА (ограниченная грузоподъемность и малая энерговооруженность), адаптация гамма-спектрометрии к съемкам с беспилотников основывается на использовании детекторов гамма-излучения существенно меньших (по сравнению с традиционной аэрогамма-спектрометрией размеров.

В России гамма-спектрометрия с БПЛА, нацеленная на решение поисковых задач, получила более серьезное развитие, во многом благодаря энтузиазму А.В. Паршина, работающему в содружестве со специалистами ВИМС [2]. При выполнении подобных съемок используется спектрометр с детектором CsI (Tl/Na) объемом до 0,4 л. Однако мы вынуждены констатировать, что выполнение кондиционных (в традиционном понимании) аэрогамма-спектрометрических съемок с использованием беспилотных носителей и детекторов малого и сверхмалого размера для решения прогнозно-поисковых задач в настоящее время невозможно. Предлагаемые альтернативные варианты могут оказаться эффективными в отдельных конкретных случаях, при условии корректного геолого-геофизического обоснования, с учетом особенностей строения целевого объекта.

Рис. 1. Варианты БПЛА. Слева направо: конвертоплан, самолет, мультироторный

Рис. 2. Мультироторный беспилотный летательный аппарат с гибридным двигателем и серийным датчиком CS-3 в выпускной гондоле

Подобно гамма-спектрометрии, с учетом технических характеристик носителей, с их помощью доступны к реализации лишь пассивные методы аэроэлектроразведки, основанные на изучении естественных электромагнитных полей Земли, и комбинированные системы, с размещением источника поля на поверхности и регистрацией отклика с БПЛА.

Таким образом можно констатировать, что полноценное аэрогеофизическое обеспечение детальных поисковых и оценочных работ с использованием БПЛА в настоящее время в большинстве случаев невозможно. В качестве альтернативы при этом можно рассматривать использование сверхлегких пилотируемых летательных аппаратов, активно предлагаемых в последние годы (рис. 3).

Такие носители легко транспортируются (например, в сложенном виде один из самолетов может размещаться в прицепе, буксируемом легковым автомобилем), не требуют использования специальной взлетно-посадочной полосы, обладают высокой производительностью (до 5 часов автономного полета со скоростью до 110 км/ч) и не имеют юридических ограничений для выполнения съемок, подобных БПЛА.

Один из вариантов подобных самолетов адаптирован к установке двух датчиков магнитометров (в специальных боксах на концах крыльев) и полноценного спектрометра с суммарным объемом детектора до 16 литров, который размещается в специальном кожухе, закрепленном под фюзеляжем.

С учетом новейших аппаратурных разработок последних лет, ведущихся в т.ч. в направлении уменьшения габаритных размеров, энергопотребления и веса, комплекс методов может быть дополнен одной из модификаций пассивной (без специальных источников поля) электроразведки, и даже гравиметрией с использованием специальных бесплатформенных гравиметров. Приемники электромагнитного поля для реализации электроразведки в модификации VLF (СДВР) при этом могут быть установлены совместно с датчиками магнитометра.

Таким образом, сверхлегкие пилотируемые летательные аппараты, практически не уступая БПЛА в организации работ, детальности и разрешающей способности съемок, позволяют обеспечит максимально полный комплекс исследований с одного облета территории.

Заключение

Современные аэрогеофизические технологии являются эффективным средством оптимизации геологоразведочного производства за счет сокращения времени на опоискование территории и более точного позиционирования дорогостоящих наземных заверочных и горно-буровых работ. При этом расширение парка летательных аппаратов позволяет оптимизировать затраты на выполнение полевых работ.

Необходимость во многих случаях использования максимально полный комплекс доступных аэрогеофизических методов, основанных на изучении разнородных параметров среды (магнитные свойства, электропроводность, радиоактивность), определяют преимущества использования во многих случаях пилотируемых сверхлегких летательных аппаратов, при этом полноценное решение поставленных геологических задач возможно лишь при привлечении современных методов интерпретации, комбинирующих детерминистский (основанный на методах прямого физико-математического моделирования) и вероятностно-статистический подходы.

Рис. 3. Варианты сверхлегких летательных аппаратов

Литература

1. Бабаянц П. С. Современные аэрогеофизические технологии при прогнозе, поисках и оценке месторождений твердых полезных ископаемых / Бабаянц П. С., Контарович О. Р., Трусов А. А. // М., Разведка и охрана недр, 2020. – № 11. – С. 30–40.
2. Паршин А. В. Первые результаты методических работ по применению беспилотных аэрогеофизических технологий на стадии поисков месторождений урана / Паршин А. В., Гребенкин Н. А., Морозов В. А., Ржевская А. К., Шикаленко Ф. Н. // Разведка и охрана недр, 2017. – № 11. – С. 59–64.
3. Паршин А. В. Настоящее и будущее беспилотной аэрогеофизики в России / Паршин А. В., Цирель В. С., Анцев В. Г. // М., Разведка и охрана недр, 2017. – № 8. – С. 33–39.

ЕСТЕСТВЕННАЯ И ТЕХНОГЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ ПОЧВ В РАЙОНЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АЛМАЗОВ ИМ. М. В. ЛОМОНОСОВА

А. В. Баженов, Е. Ю. Яковлев, С. В. Дружинин

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лавёрова УрО РАН
Архангельск, Россия, abv-2009@yandex.ru

RADIOACTIVE ISOTOPES IN THE SOILS IN THE AREA OF THE DIAMOND DEPOSIT NAMED AFTER M. V. LOMONOSOV

A. V. Bazhenov, E. Y. Yakovlev, S. V. Dryzhinin

N.Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Arkhangelsk, Russia, abv-2009@yandex.ru

The paper studies the content of natural and technogenic radionuclides in the soils of the central part of the Belomorsko-Kuloi plateau in the area of the diamond deposit named after M. V. Lomonosov. The maximum activity of technogenic ^{137}Cs is concentrated in the forest litter (from 11.4 to 71.8 Bq/kg) and the humus horizon (from 26.7 to 105 Bq/kg). In the podzolic and illuvial horizons, a sharp decrease in activity occurs, reaching values below the detection limits in the parent rock. The distribution of natural radioisotopes ^{40}K, ^{226}Ra and ^{232}Th in the soil horizons is more chaotic and is more related to the composition of the constituent rocks, the presence of moraine deposits.

Введение

Радиоактивное загрязнение территории Европейского Севера сформировалось в результате различных факторов: испытаний атомного оружия в атмосфере, в том числе на полигонах Новой Земли, аварий на атомных электростанциях, подземных ядерных взрывов в мирных целях, влияния объектов ядерной энергетики, пространственного перераспределение радиоактивных изотопов в результате естественных атмосферных, гидрологических и геологических процессов [1, 2]. Поскольку почва покрывает значительные площади, то она является основным депонирующим радионуклиды компонентом окружающей среды, в котором сосредоточены основные запасы техногенных изотопов [3]. Почва является важнейшим и инерционным звеном биогеохимической системы, от скорости миграции радионуклидов в которой зависят темпы их распространения по всей цепочке [4]. Из-за различий во фракционном составе ^{137}Cs, поступающего в ландшафты с глобальными, региональными или локальными выпадениями, особенности его миграции и аккумуляции в фоновых ландшафтах могут отличаться от закономерностей, выявленных на примере загрязненных территорий. Кроме того, его радиальное и латеральное распределение в фоновых ландшафтах сформировалось за более длительный период, чем тот, который характерен для территорий, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Нами впервые проведены исследования по содержанию техногенных и естественных радиоактивных изотопов в почве района месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова, расположенного на территории Беломорско-Кулойского плато (Архангельская область).

Материалы и методы

Экспедиционные работы по изучению почвенных разрезов и отбору проб для определения содержания радионуклидов проводились в июне-июле 2018 г. сотрудниками лаборатории экологической радиологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лавёрова УрО РАН (г. Архангельск). В полевых условиях производилось описание морфологических свойств генетических горизонтов почв. Места заложения почвенных разрезов фиксировались GPS-навигатором

и показаны на рисунке 1. Из генетических почвенных горизонтов (до материнской почвообразующей породы) было отобрано 69 проб, которые упаковывались в пластиковые пакеты и маркировались. В лабораторных условиях пробы высушивались до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при температуре 105 °С до постоянной массы.

После взвешивания пробы почв помещались в сосуд Маринелли для измерения удельной активности изотопов методом гамма-спектрометрии. Регистрация гамма-излучений от счетного образца почв, а также обработка спектров проводилась с использованием программно-аппаратурного комплекса «Прогресс-гамма» ФВКМ.412131.002-03 [5]. Калибровка гамма-спектрометра по энергии для контроля за сохранностью параметров установки проводилась после каждого измерения с использованием комбинированного контрольного источника ОИСН-137-1 в сосуде Маринелли – 1 литр. Минимальное время экспонирования счетного образца составляло 3600 секунд. Однако в зависимости от активности пробы время экспонирования в отдельных образцах со слабой активностью увеличивалось.

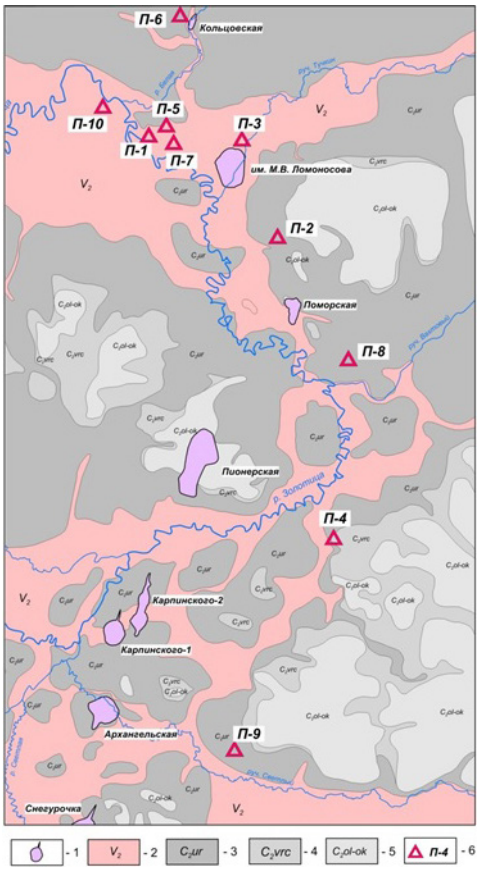


Рис. 1. Схема Золотицкого участка Зимнебережного алмазоносного района (по данным ПАО «Севералмаз»)

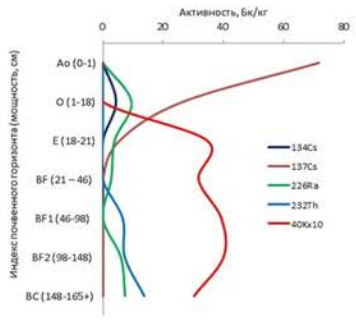
1 – трубка взрыва, 2 – венд, верхний отдел (падунская свита – песчаники с прослоями алевролитов), 3–5 – каменноугольные отложения, средний отдел: 3 – урзугская свита – с редкими маломощными прослоями алевролитов, реже известняков и гравелитов; 4 – воеречнская свита и 5 – олмугo-окуневская свита – известняки и доломитизированные известняки с включениями кремней; 6 – точки заложения почвенных разрезов

Результаты и их обсуждение

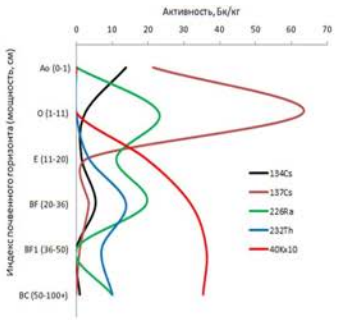
Рассматриваемый регион относится к формации кислых сильно промерзающих почв бореального холодного климатического пояса Основными почвообразующими породами являются четвертичные отложения. Все четвертичные породы, как правило, бедны химико-минералогическим составом, что отражается на всей территории Европейского Севера. Почвы формируются под елово-сосновыми лесами, надпочвенный покров представлен болотной растительностью, редко разнотравьем на хорошо дренируемых возвышенных территориях. В западной части зоны господствует ель европейская, в восточной - ель сибирская с пихтой и лиственницей. Подзолистые почвы северо-таёжной зоны Европейского Севера России обладают сильно кислой реакцией почвенного раствора, значения гидролитической кислотности снижаются с глубиной профиля, наличие низкой емкости катионного обмена, ненасыщенность почвенно-поглощающего комплекса основаниями, преобладание соединений магния над кальцием, низкое содержание гумуса – десятые доли процента. Неблагоприятные физические свойства песчаных почв: высокая водопроницаемость и малая влагоемкость.

Вдоль левого берега русла р. Золотицы от руч. Светлого до устья р. Белой было заложено 10 почвенных разрезов с целью изучения естественной и техногенной радиоактивности в генетических горизонтах почвы, отнесенной к подзолистым иллюви-

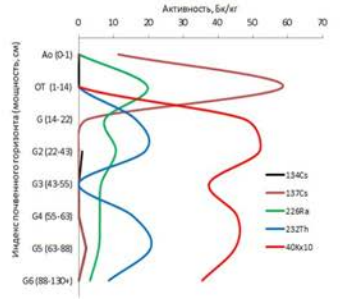
Рис. 2. Профиль подзолистой иллювиально-железистой почвы в районе месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова



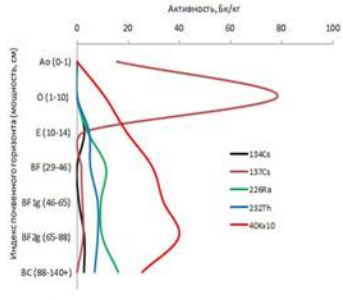
Разрез П-1-18 - подзол иллювиально- железистый поверхностно-элювиальный (типичный)



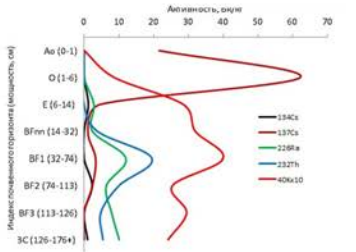
Разрез П-2-18 - подзол иллювиально- железистый мелкоэлювиальный (песчаный на завалуненных моренных суглинках)



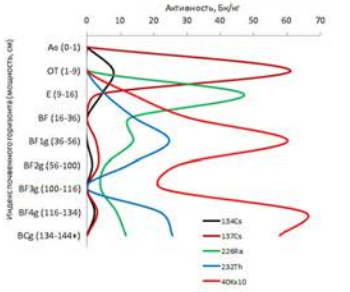
Разрез П-3-18 - аллювиальная почва



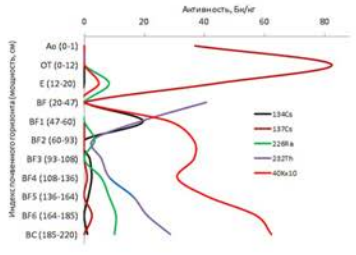
Разрез П-4-18 - подзол глееватый иллювиально-железистый неглубокоэлювиальный



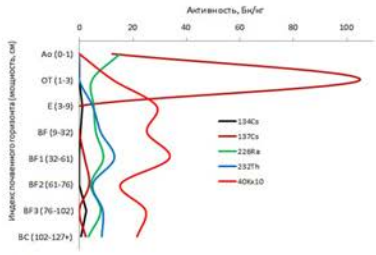
Разрез П-5-18 - подзол иллювиально-железистый поверхностно-элювиальный



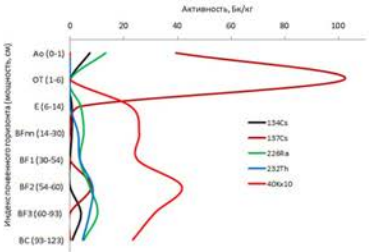
Разрез П-6-18 - подзол иллювиально-железистый песчаный на делювиальных супесчано-суглинистых слоистых отложениях



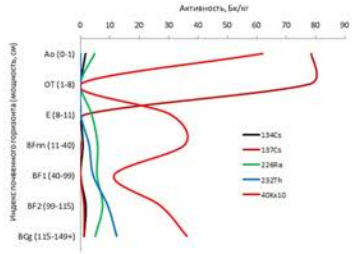
Разрез П-7-18 - подзол иллювиально – железистый супесчаный, подстилаемый с 90 см глиной



Разрез П-8-18 - подзол иллювиально-железистый супесчаный с подстилаем мореной глубже 30 см



Разрез П-9-18 - подзол иллювиально-железистый супесчаный на доломитовых отложениях



Разрез П-10-18 - подзол иллювиально-железистый языковатый супесчаный с 40 см подстилаемый слоистыми делювиальными суглинисто-песчаными отложениями

Рис. 3. Вертикальное распределение активности радионуклидов по генетическим горизонтам почв исследуемого района

ально-железистым автоморфным и аллювиальным почвам таежной зоны. Наиболее типичный профиль подзолистой иллювиально-железистой почвы исследуемой территории отображен на рисунке 2.

Максимальная активность ^{137}Cs сосредоточена в лесной постилке (от 11,4 до 71,8 Бк/кг) и гумусовом горизонте (от 26,7 до 105 Бк/кг). В подзолистом и иллювиальном горизонте происходит резкое снижение активности, достигая в почвообразующей породе предельно измеряемых величин – от 2 до 3 Бк/кг. Характерным для некоторых почвенных горизонтов является наличие короткоживущего ^{134}Cs (период полураспада – 2,062 года), что может говорить о его вероятном поступлении за счёт широтного атмосферного переноса после аварии на АЭС в г. Фукусима. Полученные значения удельной активности техногенного ^{137}Cs в целом для всех исследованных почвенных разрезов показали, что его концентрация происходит в верхних органических горизонтах, свидетельствуя о слабой вертикальной миграции вниз по профилю за период накопления. Особенность распределения изотопа ^{137}Cs по почвенному профилю обусловлена внешним воздействием на почву – атмосферные выпадения и условием ее формирования.

Общая тенденция накопления естественных изотопов ^{40}K, ^{226}Ra и ^{232}Th в почвенных горизонтах независимо от типа почвы выражена слабо. В ряде почвенных разрезов наблюдается увеличение естественных радионуклидов с глубиной, в основном это характерно для ^{40}K, где его активность изменялась от 82,6 до 652 Бк/кг. Активность ^{226}Ra и ^{232}Th в почвенном профиля изменяется в пределах от 2,4 до 47,2 Бк/кг и от 2,9 до 40,6 Бк/кг соответственно. Это связано с тем, что торий прочно сорбируется почвой, поэтому миграция его по почвенному профилю выражена слабо. Он осаждается в почвах в виде гидроксидов. Почвы, развитые на изверженных породах, характеризуются максимальными концентрациями тория в нижних горизонтах. Напротив, карбонатные почвы накапливают этот элемент в верхних слоях. Кларковое содержание Ra в почвах составляет $8 \bullet 10^{-11}$ %. Количество радиоактивных элементов. содержащихся в почве, в значительной мере определяется концентрацией изотопов в подстилающих горных породах. Больше обогащены радием суглинистые и глинистые почвы, песчаные почвы, напротив бедны этим элементом.

Вертикальное распределение активности радионуклидов по генетическим горизонтам почв исследуемого район показано на рисунке 3.

Заключение

1. Максимальные содержания ^{137}Cs определены в лесной подстилке и гумусовом горизонте (59–105 Бк/кг). Вниз по профилю содержание ^{137}Cs резко снижается. Некоторая часть радиоцезия может проникать на глубину до 1,2 м. Пики повышения концентрации в иллювиальных горизонтах (BF, BFg) связаны с увеличением содержания глинистой фракции, гидроксидов Fe, Al, повышающих сорбционную способность почв.

2. Лесная подстилка и гумусовый горизонт выступает в роли биогеохимического барьера, который удерживает радиоактивные элементы в почве на длительное время. В виду высокой фильтрационной способности подзолов нижележащие горизонты не являются надежными барьерами. ^{137}Cs и другие радиоизотопы могут связываться с гумусовыми веществами, оксидами и гидроксидами железа и алюминия, образовывать гумусово-железистые комплексы, осаждаться в почвенных новообразованиях, например, входить в минеральный состав ортштейнов.

3. Промывной водный режим, характерный для подзолов, способствует миграции радиоизотопов. ^{137}Cs из водонерастворимой формы при промывном режиме верхнего горизонта переходит в водорастворимое через несколько суток, в последствие, может произойти загрязнение не только всей глубины почвы, но и грунтовых вод.

4. Распределение естественных радиоизотопов ^{40}K, ^{226}Ra и ^{232}Th имеет более хаотичный характер и в большей степени связано с составом слагающих пород. Подвижность и накопление радионуклидов по профилю зависит от гранулометрического состава, содержания органического вещества, полуторных оксидов, минералогического состава, а также от температурного и водного режима.

Экспедиционные исследования выполнены при финансовой поддержке субсидии на выполнение темы государственного задания «Комплексные изотопно-геохимические исследования качества природной среды и идентификация процессов её трансформации на приморских территориях Европейского Севера в современности и в прошлом» (№ 0409-2019-0037 рег. номер НИОКТР АААА-А19-119011890018-3).

Аналитические и лабораторные исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60151 Арктика «Влияние алмазодобывающей деятельности на состояние биогеоценозов Арктической зоны РФ (на примере Европейского Севера)».

Литература

1. Козодуб Г. М.. Радиобиологические исследования хвойных в районе Чернобыльской катастрофы (1986–2001 гг.) / Козодуб Г. М., Таскаев А. И. – Москва: Изд-во ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2002. – 272 с.

2. Киселев Г. П. Радиоактивные изотопы в почвах Архангельской промышленной агломерации / Киселев Г. П., Баженов А. В, Киселева И. М //

Вестник Северного (Арктического) Федерального университета. Серия Естественные науки, 2013. – № 4. – С. 12–20.
3. Баженов А. В. Цезий-137 в почвах Архангельской области: автореф… дис. канд. геол.-минерал наук. – Москва: Ин-т геоэкологии РАН, 2001. – 23 с.
4. Ефремов И. В.. Особенности миграции радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в системе почва-растение / Ефремов И. В., Рахимова Н. Н., Янчук Е. Л. // Вестник ОГУ, 2005. – № 12. – С. 42–46.
5. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс». – Москва: Изд-во ООО НТЦ «Амплитуда», 2016. – 12 с.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПИТЬЕВЫХ ВОД СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

Г. Е. Байкенова[1], Н. В. Барановская[2], А. А. Какабаев[1], Р. И. Берсимбаев[3]

[1]Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова
г. Кокшетау, Казахстан, guliander@bk.ru
[2]Томский политехнический университет
г. Томск, Россия, nata@tpu.ru
[3]Евразийский Национальный университет им. Л. Н. Гумилева
г. Нур-Султан, Казахстан, ribers@mail.ru

GEOCHEMICAL FEATURES OF RADIOACTIVE ELEMENTS IN SALT SEDIMENTS OF DRINKING WATER IN NORTHERN KAZAKHSTAN

G. E. Baikenova[1], N. V. Baranovskaya[2], A. A. Kakabayev[1], R. I. Bersimbaev[3]

[1]Sh. Ualikhanov Kokshetau University
Kokshetau, Kazakhstan, Kazakhstan
[2]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, nata@tpu.ru
[3]L. N. Gumilyov Eurasian National University
Nur-Sultan, Kazakhstan, ribers@mail.ru

Radioactive elements research in the scale of drinking water is relevant at the present time. Uranium is of particular interest to the public because of its complex behavior in the natural water system. The paper presents the results of studies of salt deposits of drinking water in Northern Kazakhstan, obtained by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) at the Problem Research Laboratory of Hydrogeochemistry of Tomsk Polytechnic University. Based on the results of the analysis, the statistical parameters of the distribution of thorium and uranium in the scale of drinking water in the territory of Northern Kazakhstan were calculated. Comparative data of uranium and thorium are presented both between Akmola and North Kazakhstan regions, and with other regions of Russia.

Введение

Обеспечение чистой и безопасной питьевой водой – одно из необходимых условий здорового общества. Многими исследованиями доказана связь химического состава воды и болезней щитовидной железы, желудочно-кишечного тракта, психических расстройств, болезней почек, печени, злокачественных опухолей и других заболеваний [3–6, 15, 18–19].

Во всем мире прилагаются усилия для проверки питьевой воды на наличие урана и тория, определения доминирующих видов и их неблагоприятного воздействия на здоровье населения [14, 17, 20]. Уран и торий – радиоактивные элементы, содержание которых в верхней части континентальной коры колеблется в следующих пределах: Th – 8,6–10,7 мг/кг, U – 1,5–2,8 мг/кг [2, 10]. В осадочных карбонатных породах средний уровень содержания урана и тория составляет 4,3 мг/кг для Th и 2,2 мг/кг для U [10].

Всем известно, что перед употребление питьевую воду часто подвергают кипячению в нагревательной системе (чайники, самовары и т. д.). Некоторые работы ученых показали [1, 7–9, 12–13, 16], что, накопительной средой может выступить накипь питьевой воды, которая может быть индикатором качества воды и отражать изменения геохимической обстановки региона.

Цель нашего исследования – определение геохимических особенностей радиоактивных элементов в солевых отложениях питьевых вод Северного Казахстана

Материалы и методы

Осенью 2018 г. нами проведено изучение радиоактивных элементов в солевых отложениях питьевых вод с территории Северного Казахстана (Акмолинская и Северо-Казахстанская области). Отобрано всего 18 проб. Пробоотбор и пробоподготовка осуществлялись согласно патенту [11] в Кокшетауском университете им. Ш. Уалиханова и в Томском политехническом университете. Накипь отбирали ножом из нержавеющей стали со стенок эмалированной и пластиковой посуды (чайники, самовары и т. д.), где кипятилась вода. При взятии накипи фиксировали тип посуды, также отмечали примерную глубину горизонта водоснабжения, из которой была взята питьевая вода. Затем все пробы высушивали при комнатной температуре, после чего истирали в агатовой ступке до состояния пудры.

Радиоактивные элементы в накипи питьевых вод определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета (заведующая лабораторией к.г.-м.н. А. А. Хващевская).

Результаты исследования подвергались обработке с помощью пакета программ STATISTICA 10 и Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение

Нами были изучены радиоактивные элементы (торий и уран) в накипи питьевых вод с помощью метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). По результатам анализа проведен расчет статистических параметров распределения урана и тория в солевых отложениях питьевых вод исследуемой территории (табл. 1). Следует отметить, что по результатам исследования среднее содержание урана превышает среднее для тория, что характерно для пород Северного Казахстана. Для Северного региона страны характерны повышенные

Таблица 1. Статистические параметры распределения тория и урана в накипи питьевых вод на территории Северного Казахстана

Элемент	Средн.	Стандарт. ошибка	Стандарт. отклонение	Медиана	Мода	Мин.	Макс.	V, %
Th	0,06	0,04	0,15	0,0125	0,0025	0,0025	0,618	245
U	58,17	22,53	95,6	23,43	Multiple	2,88	368,8	164

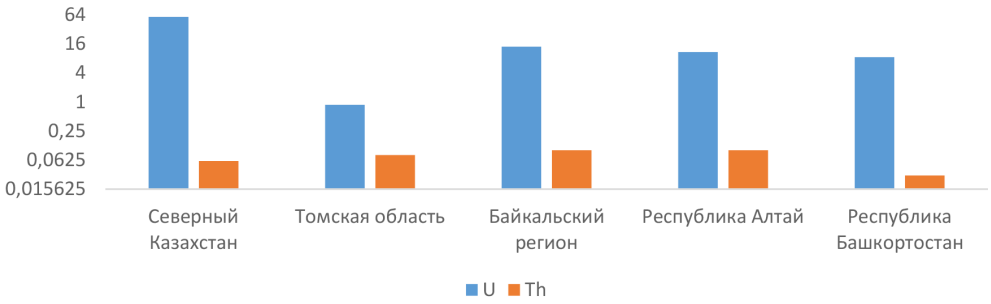


Рис. 1. Сравнительный анализ радиоактивных элементов солевых отложений питьевых вод различных территории (мг/кг, шкала логарифмическая)

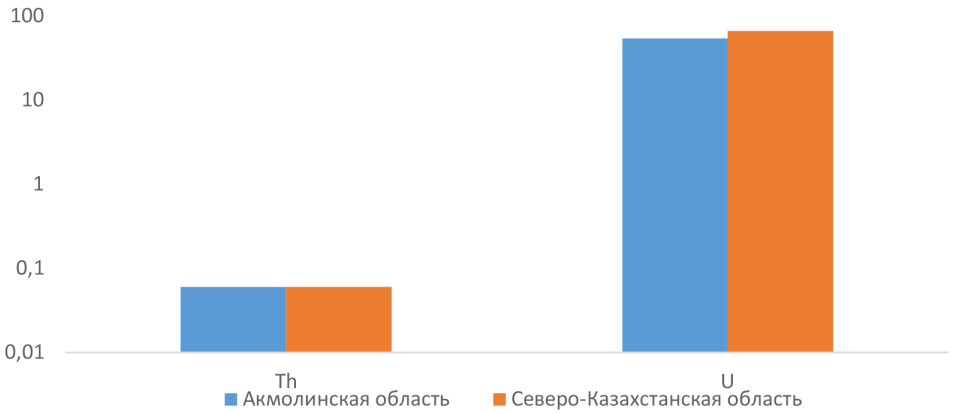


Рис. 2. Сравнительный анализ радиоактивных элементов солевых отложениях питьевых вод Акмолинской и Северо-Казахстанкой областях (мг/кг, шкала логарифмическая)

концентрации урана и тория из-за специализированных геологических формаций. Высокая специализация на уран и торий отмечается для гранитоидов изучаемой территории. Весьма важной особенностью данных гранитоидов является то, что большая часть урана находится в «миграционной» форме. При этом уран легко выщелачивается из массивов трещинными водами, также подземными и поверхностными водами он выщелачивается из кор выветривания.

Также в таблице представлен анализ коэффициента вариации (V), который показал, что V > 100 % как для урана, так и для тория, что указывает на неоднородный характер их распределения.

Сравнение среднего содержания радиоактивных элементов солевых отложений питьевых вод Томской области, Байкальского региона, Республики Алтай, Республики Башкортостан и Северного Казахстана показало, что накипь последнего отличается высоким содержанием урана, а в Байкальском регионе и в Республике Алтай наблюдается повышенное содержание тория (рис. 1). Высокое содержание урана в Северном Казахстане объясняется тем, что Северный Казахстан является одним из крупнейших регионов, где сконцентрированы месторождения урановых руд.

На рисунке 2 представлен сравнительный анализ содержания урана и тория в солевых отложениях питьевой воды Акмолинской и Северо-Казахстанской областей, который показал, что среднее содержание урана в Северо-Казахстанской области выше, чем в Акмолинской области. А среднее содержание тория в двух областях показали одинаковые результаты. Следует отметить, что содержания радиоактивных элементов в накипи питьевых вод двух близлежащих областей схожи, это связано с тем, что обе территории относятся к Северо-Казахстанской урановорудной провинции, соответственно, имеют общее тектоническое строение.

Заключение

Нами изучены радиоактивные элементы в накипи питьевых вод Северного Казахстана (Акмолинской и Северо-Казахстанской областей). Проведенные исследования показывают, что в Северном Казахстане содержание урана в накипи существенно выше, чем тория. Также среднее содержание урана на исследуемой территории значительно выше в сравнении с другими территориями некоторых регионов России. Данные исследования еще раз доказывают, что территория Северного Казахстана является уникальной урановой биогеохимической провинцией.

Литература

1. Арынова Ш. Ж. Элементный состав солевых образований из природных пресных вод как индикатор экологической безопасности водопользования: автореф. дис. … канд. геол.-мин. наук. – Томск, 2017. – 22 с.
2. Григорьев Н. А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 382 с.
3. Дианова Д. Г. Научные основы гигиенического анализа закономерностей влияния гаптенов, поступающих с питьевой водой, на иммунную систему у детей: автореф. дис. … докт. мед. наук. – Пермь, 2019. – 48 с.
4. Иванов А. В., Тафеева Е. А., Давлетова Н. Х. Современные представления о влиянии качества питьевой воды на состояние здоровья населения // Вода: Химия и экология, 2012. – № 3. – С. 48–53.
5. Колмыкова Л. И. Особенности водной миграции йода и селена в геохимически контрастных ландшафтах Брянской области: автореф. дис. … канд. геол.-минерал. наук.. – Москва, 2017. – 27 с.
6. Ларикова Н. В. Генотоксикологическая оценка питьевой воды и некоторые показатели заболеваемости населения Северо-Казахстанской области / С. В. Бабошкина, И. Н. Лиходумова, Н. П. Белецкая и др. // Экологическая генетика, 2012. – Т. 4. – С. 40–49.
7. Монголина Т. А. Геохимические особенности солевых отложений (накипи) питьевых вод как индикатор природно-техногенного состояния территории: автореф. дис. … канд. геол.- минерал. наук. – Томск, 2011. – 21 с.
8. Соктоев Б. Р. Геохимия карбонатной составляющей природных пресных вод и ее индикаторное значение в эколого-геохимических и прогнозно-металлогенических исследованиях (на примере Байкальского региона): автореф. дис. … канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2015. – 22 с.
9. Соктоев Б. Р., Рихванов Л. П., Тайсаев Т. Т., Барановская Н. В. Геохимическая характеристика солевых отложений питьевых вод Байкальского региона // Известия Томского политехнического университета, 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 203–223.
10. Смыслов А. А. Уран и торий в земной коре. – Л.: Наука, 1974. – 231 с.
11. Способ определения участков загрязнения ураном окружающей среды: пат . 2298212 Рос. Федерация. Л. П. Рихванов, Е. Г. Язиков, Н. В. Барановская, Е. П. Янкович; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2005120840; заявл. 04.07.05; опубл. 27.04.07.
12. Фархутдинов И. М., Соктоев, Б. Р., Рихванов Л. П., Фархутдинов А. М., Злобина А. М., Исмагилов Р. А., Никонов В. А., Белан Л. Н. Влияние геологических факторов на распределение урана и

тория в солевых отложениях питьевых вод (Республика Башкортостан) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 16–27.
13. Язиков Е. Г., Рихванов Л. П., Барановская Н. В. Индикаторная роль солевых образований в воде при геохимическом мониторинге // Известия вузов. Геология и разведка, 2004. – № 1. – С. 67–69.
14. Assessment of age-dependent dose due to intake of uranium and thorium in drinking water from Sikar District, Rajasthan, India / V. Duggal, A. Rani and V. Balaram // Radiation Protection Dosimetry, 2016. – V. 171 (2). – P. 257–261.
15. Different choices of drinking water source and different health risks in a rural population living near a lead/zinc mine in Chenzhou City, Southern China / Xiao Huang, Liping He, Jun Li, Fei Yang, Hongzhuan Tan // International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015. – V. 12. – P. 14364–14381.
16. Geochemical specialization of lumescale of water sources illustrated by two regions in Siberia / Tapkhaeva A. E., Taisaev T. T., Rikhvanov L. P., Yazikov E. G., Baranovskaya N. V. // Contemporary Problems of Ecology, 2010. – V. 3. – № 4. – P. 498–507.
17. Large-Scale Uranium Contamination of Groundwater Resources in India / Rachel M. Coyte, Ratan C. Jain, Sudhir K. Srivastava, Kailash C. Sharma, Abedalrazq Khalil, Lin Ma, Avner Vengosh. // Environmental Science Technology, 2018. – V. 5 (6). – P. 341–347.
18. Quantification of radiological dose and chemical toxicity due to radon and uranium in drinking water in Bageshwar region of Indian Himalaya / Ankur Kumar, Tushar Arora, Prakhar Singh, Kuldeep Singh, Devendra Singh, P.P.Pathak, R.C.Ramola. // Groundwater for Sustainable Development, 2021. – V. 12. – P. 100491.
19. Trace element content in drinking water of nasopharyngeal carcinoma patients / Xia Ling-Wei, Liang Shao-Xian, Jiang Ji-Wen, Zhou Xiao-Juan, Li Jian // Cancer Letters, 1988. – V. 41. – P. 91–97.
20. Uranium in groundwater – a synopsis based on a large hydrogeochemical data set / T. Riedel, C. Kubeck // Water Research, 2018. – V. 129. – P. 29–38.

МИГРАЦИЯ ^{137}Cs И ^{90}Sr В ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ЮЖНОГО УРАЛА

В. Ю. Берёзкин[1], Е. М. Коробова[1], В. С. Баранчуков[1], Д. И. Долгушин[1], О. В. Тарасов[2], С. Л. Романов[3], М. В. Модоров[4], Л. Н. Михайловская[4]

[1]Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН
Москва, Россия, victor76@list.ru
[2]ФГУП «ПО "Маяк»
Озёрск, Россия, o_tarasov@mail.ru
[3]УП «Геоинформационные системы»
Минск, Беларусь, Romanov_s_l@mail.ru
[4]Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН
Екатеринбург, Россия, mila_mikhaylovska@mail.ru

MIGRATION OF ^{137}Cs AND ^{90}Sr IN ELEMENTARY LANDSCAPE-GEOCHEMICAL SYSTEMS OF THE SOUTHERN URALS

V. Yu. Berezkin[1], E. M. Korobova[1], V. S. Baranchukov[1], D. I. Dolgushin[1], O. V. Tarasov[2], S. L. Romanov[3], M. V. Modorov[4], L. N. Mikhailovskaya[4]

[1]Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the RAS
Moscow, Russia, victor76@list.ru
[2]FGUP PO "Mayak"
Ozersk, Russia, o_tarasov@mail.ru
[3]Unitary Enterprize "Geoinformation Systems"
Minsk, Belarus, romanov_s_l@mail.ru
[4]Institute of Plant and Animal Ecology, UB of the RAS
Yekaterinburg, Russia, mila_mikhaylovska@mail.ru

A detailed study of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the Chelyabinsk region was carried out to reveal patterns of their distribution in elementary landscape-geochemical systems (ELGS). Field measurements of the gamma and beta activity of the soil and vegetation cover were performed in four test sites (contaminated during the Kyshtym accident in 1957). The measurements were accompanied by a sampling of undisturbed soil cores down to a depth of 40 cm and some plant species. All samples were analyzed for ^{137}Cs and ^{90}Sr in laboratories (Moscow and Ekaterinburg). The results obtained revealed an ordered structure of ^{137}Cs and ^{90}Sr in all studied ELGS.

Введение

Многочисленные аварийные выбросы на объектах атомной промышленности, начиная с аварии в Чок-Риверской лаборатории (12 декабря 1952, Канада, International Nuclear Event Scale, INES 5) и заканчивая аварией на Фукусиме (11 марта 2011, Япония, INES 7), делают радиационное загрязнение одной из актуальнейших проблем нашего времени. Радиоактивное загрязнение различных компонентов биогеоценозов (почв, растительности, поверхностных и грунтовых вод, донных отложений) – это одно из наиболее серьезных последствий аварий, связанных с выбросами радионуклидов в окружающую среду.

В России, при аварии на «ПО Маяк» в 1957 г. радиоактивному загрязнению подверглась территория площадью около 20 тыс. км^2 [1], получившая название Восточно-уральский радиоактивный след (ВУРС). Ось загрязнения прошла через населённые пункты Берденишь, Салтыкова, Галикаева, Русская Караболка и далее в направлении на г. Тюмень [5]. Кроме того, в апреле 1967 г. на этих же территориях отмечали выпадения радиоактивной пыли из донных отложений озера Карачай [4].

Цель настоящего исследования – проверка гипотезы о закономерном характере перераспределения техногенных радионуклидов на примере ^{137}Cs и ^{90}Sr в элементарных ландшафтно-геохимических системах (вершина – склон – замыкающее понижение) Челябинской области (в зоне ВУРС), поступивших в окружающую среду в результате Кыштымской аварии 1957.

Хотя опыт ранее проведенных исследований показал, что радионуклиды в биоклиматических условиях Среднего и Южного Урала малоподвижны, и основное снижение их содержания с 1957 г. обусловлено главным образом их физическим распадом [3], исследование характера их перераспределения представляет собой весьма актуальную задачу. В новых условиях проверялась гипотеза о том, что выявленный ранее на территории Брянской области характер перераспределения ^{137}Cs в почвах ЭЛГС зоны воздействия аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.)

универсален. Предполагалось, что закономерно циклический характер, выявленный для данного изотопа [6–8], свойственен не только ^{137}Cs, но и ^{90}Sr, и способен проявлять себя в других метео-климатических условиях, на иных почвах и при наличии иных форм первичного выпадения радионуклидов.

Работы на ВУРС ведутся с 2019 г по настоящее время авторским коллективом лаборатории биогеохимии окружающей среды ГЕОХИ РАН (Москва, РФ), при участии коллег из ФГУП «ПО Маяк» (Озёрск, РФ), Института экологии растений и животных УрО РАН (Екатеринбург, РФ) и УП «Геоинформационные системы» (Минск, РБ).

Материалы и методы

Работа основана на фактическом материале, полученном в результате полевых исследований 2019–2020 годов в Челябинской области (в районе г. Озёрск).

В летний полевой период проводились полевые измерения гамма- и бета-активности почвенно-растительного покрова ЭЛГС по секущим профилям и регулярной сети с шагом 1–5 м. Измерение активности ^{137}Cs в поверхностном слое почвы выполнялась с помощью полевого гамма-спектрометра Violinist-III, снабжённого сцинтилляционным (кристалл NaI[Tl] диаметром 2,5 дюйма) коллимированным детектором [2]. На территории ВУРСа, измерения в полевых условиях с помощью прибора VIOLINIST-III впервые проводились в 2019 г. (рис. 1).

Полевое измерение бета-активности осуществлялось в тех же точках регулярной сети с помощью дозиметров-радиометров Radiascan-801 и ДРБП-03, предназначенных для измерения плотности потока бета-частиц от загрязненных поверхностей.

Все измерения осуществлялись в пределах четырёх заранее выбранных площадок: 1) «Бердениш-1» (бывшее поле, примыкающее к отселенному посёлку Бердениш, перепаханное после аварии, заложена в 2019 г.), 2) «Бердениш-2» (крутой северный берег озера Бердениш, заложена в 2019 г.), 3) «Лежнёвка» (пологий склон, под естественным лесом, в районе наиболее высокого загрязнения почвы, заложена в 2019 г.) и 4) «Бердениш-3» (к юго-востоку от оз. Бердениш, в районе горы Каменной (244 м), заложена в 2020 г.) (рис. 1).

Измерения сопровождались отбором ненарушенных почвенных кернов до глубины 40 см и укосов местных растений (рис. 2). Отобранные образцы проанализированы на содержание ^{90}Sr в полевой лаборатории, а ^{137}Cs и ^{90}Sr (в избранных пробах) – в лабораторных условиях (на гамма-спектрометрах с ППД из высокочистого германия и радиохимическим методом соответственно) в ГЕОХИ РАН и ИЭРиЖ УрО РАН.

Результаты и их обсуждение

Измерения показали, что при явной упорядоченной дифференциации полей загрязнения, как радиостронция, так и радиоцезия, закономерно однонаправленного их перераспределения в системе водораздел – склон – подножье склона, от вершины к понижению, не наблюдалось (рис. 3 и 4).

В пределах наиболее загрязнённой площадки «Лежнёвка» наблюдался резко изменчивый, полицентрический характер структуры поля загрязнения,

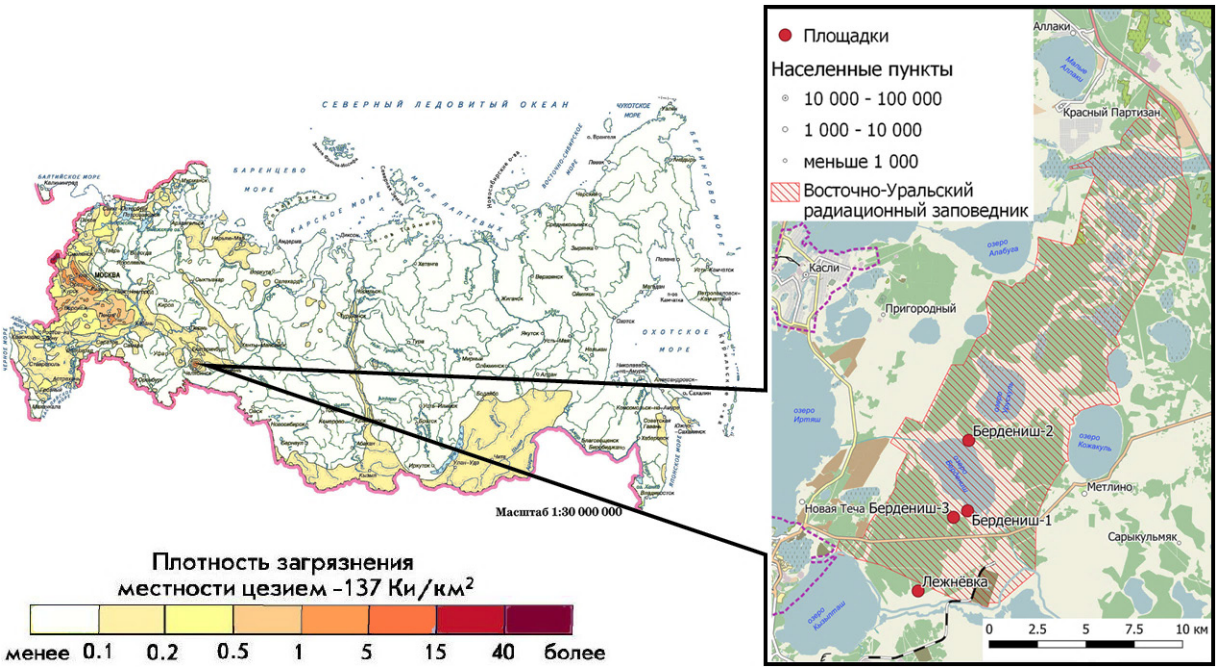


Рис. 1. Карта фактического материала: отбор проб почв и растительности 2019–2020 гг.

прослеживающийся как в отношении ^{137}Cs, так и ^{90}Sr (рис. 2). При этом выраженная полицентричность структуры поля загрязнения в почвенно-растительном покрове сохраняется и при увеличении уровня детальности съемки до шага 1 × 1 м.

Относительное обогащение верхних горизонтов почв радионуклидами, наблюдается в самых разнообразных элементарных ландшафтах во всех тестовых участках и, по-видимому, может быть объяснено сочетанием различных факторов: от притока грунтовых вод в нижней части склона до эрозии.

Схожий характер варьирования активности, также фиксировавший отсутствие однонаправленного латерального переноса, был выявлен и на участке бывшего агроценоза «Бердениш-1» (рис. 3 и 4), несмотря на глубокую вспашку участка, осуществленную непосредственно после аварии. Это косвенно свидетельствует, во-первых, о том, что в пределах

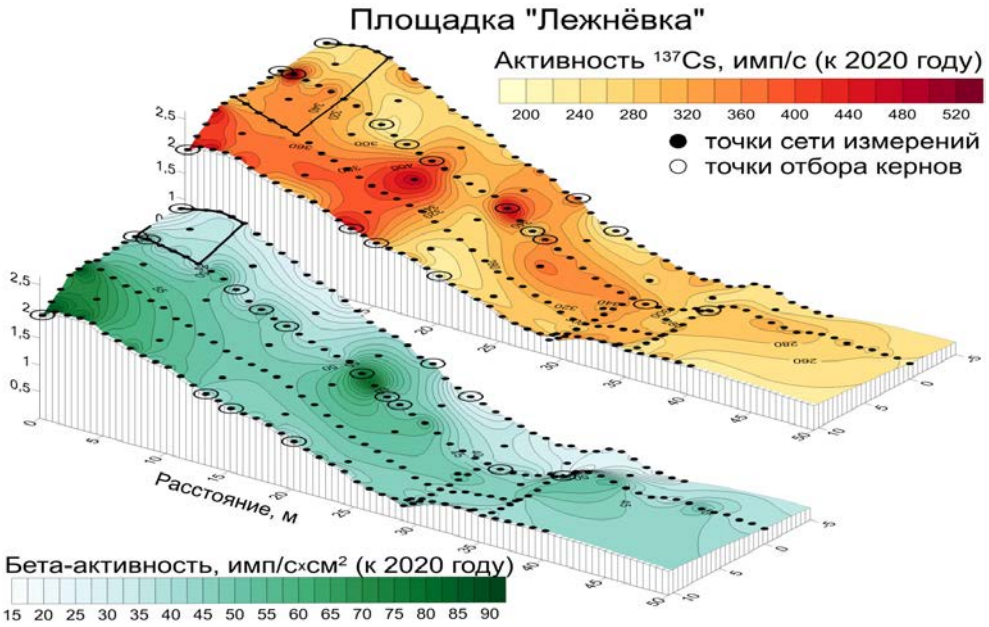


Рис. 2. Площадка «Лежневка» (зона высокого загрязнения)

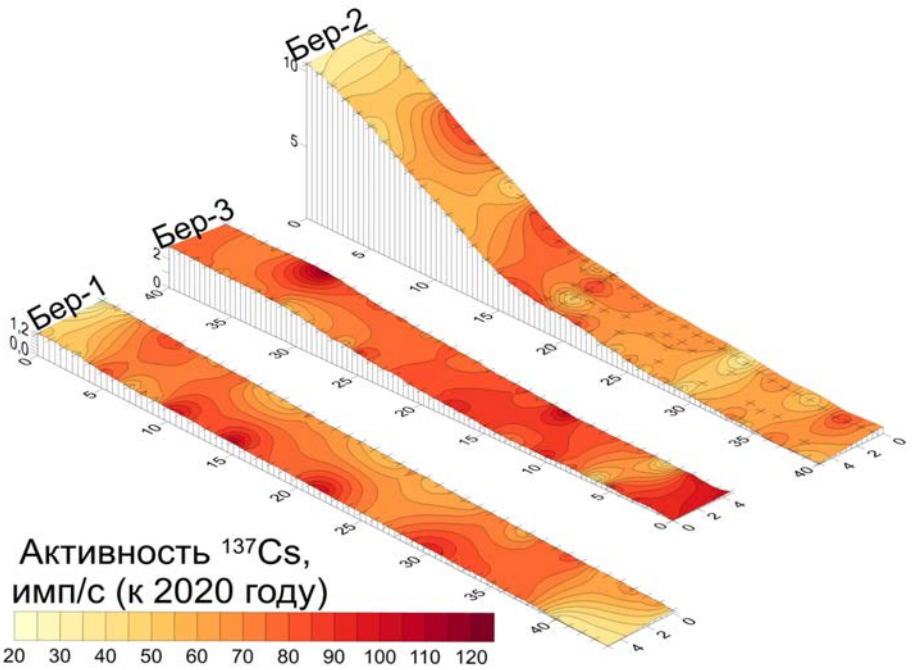


Рис. 3. Структура поля загрязнения ^{137}Cs на разных тестовых участках, характеризующих ЭЛГС

1) Бердениш-1: пологий склон, бывшая пашня; 2) Бердениш-2: крутой склон на берегу озера; 3) Бердениш-3: пологий склон горы Каменная, мощность почвы над плотными породами (серпентинитами) не превышает 40 см.

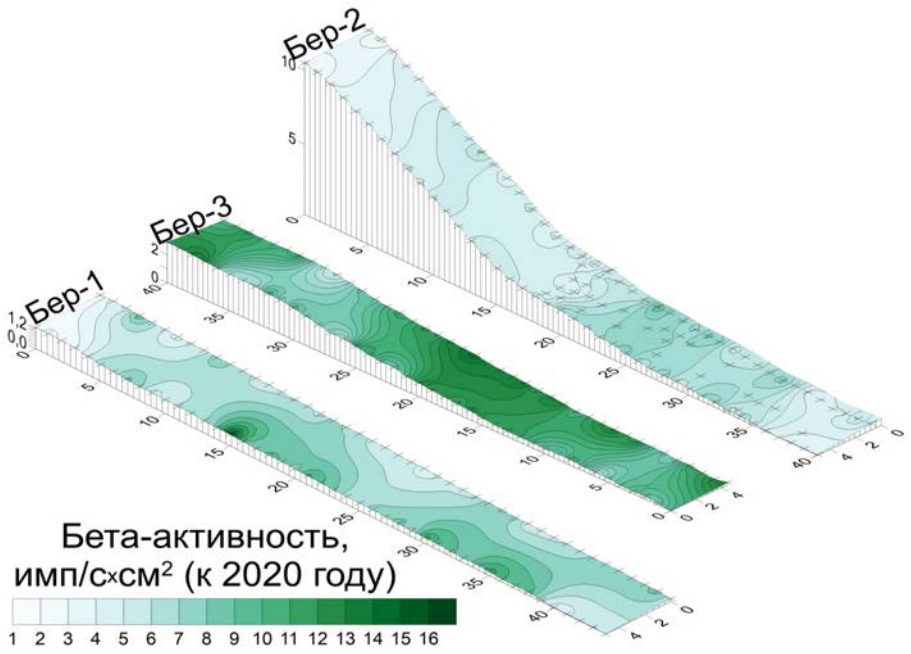


Рис. 4. Структура поля загрязнения ^{90}Sr в разных ландшафтно-геохимических условиях

1) Бердениш-1: пологий склон, бывшая пашня; 2) Бердениш-2: крутой склон на берегу озера; 3) Бердениш-3: пологий склон горы Каменная, мощность почвы над плотными породами (серпентинитами) не превышает 40 см.

местной ЭЛГС действует схожий механизм перераспределения вещества, а, во-вторых, о том, что действие этого механизма продолжается и в условиях антропогенно трансформированных систем.

Для растительности, в пределах обследованных площадок, в целом, наблюдалась схожая картина циклической изменчивости активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЭЛГС. Однако, нельзя не отметить различный вклад отдельных видов в концентрацию исследуемых радионуклидов в растительном покрове. Так, наибольшие концентрации ^{90}Sr были выявлены в крапиве двудомной (*Urtica dioica L.*) в пределах площадки «Бердениш-1» (78 ± 13 кБк/кг в.с.м.) и в землянике лесной (*Fragaria vesca L.*) в пределах площадки «Лежнёвка» (1658 ± 240 кБк/кг в.с.м.).

Выводы

1. В пределах всех обследованных ЭЛГС подтверждено наличие значительной упорядоченной дифференциации ^{137}Cs и ^{90}Sr, обусловленной процессами их вторичного перераспределения, при этом не связанной с однонаправленным переносом от вершины к замыкающему понижению, хотя латеральная миграция также имеет место;

2. Подтверждена выявленная ранее (2019 г.) циклическая изменчивость содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЭЛГС в направлении от вершин к понижениям. Ранее такая циклическая изменчивость активности Cs-137 наблюдалась нами в Брянской области, в районе техногенных выпадений радионуклидов аварии ЧАЭС (1986);

3. Схожая структура полей ^{137}Cs и ^{90}Sr, имеет и несомненные различия, что отвечает их разной подвижности.

4. Циклическая изменчивость поверхностной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr имеет место и в растительном покрове ЭЛГС что, несомненно, отражает специфику функционирования единого механизма миграции в системе почва-растение, где рельеф является основным диспетчером распределения воды.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00816.

Литература

1. Алексахин Р. М., Булдаков Л. А., Губанов В. А. и др. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Под общ. ред. Л. А. Ильина и В. А. Губанова. – М.: Изд. АТ, 2001. – 752 с.
2. Романов С. Л., Коробова Е. М., Самсонов В. Л. Опыт применения модернизированного прибора VIOLINIST-III в полевых радиоэкологических исследованиях. //Ядерные измерительно-информационные технологии, 2011. – № 3 (39). – С. 56–61.
3. Тарасов О. В., Федорова О. В., Тананаев И. Г., Сергиенко В. И. Формы состояния и миграция радионуклидов в почвах Восточно-уральского радиоактивного следа // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук, 2016. – № 1 (185). – С. 47–52.

4. Челябинская область: ликвидация последствий радиационных аварий / Под ред. А. В. Аклеева. – Челябинск, 2006. – 344 с.
5. Экологические и медицинские последствия радиационной аварии 1957 года на ПО «Маяк» / Под ред. А. В. Аклеева, М. Ф. Киселева. – М., 2001. – 294 с.
6. Korobova E., Romanov S. Experience of mapping spatial structure of Cs-137 in natural landscape and patterns of its distribution in soil toposequence // J. Geochem. Explor., 2011. – № 109, 1–3. – P. 139–145.
7. Korobova Elena, Sergey Romanov, Vladimir Baranchukov, Victor Berezkin, Andrey Korotkov, Nikolay Dogadkin. Specificity of the 137Cs distribution in arable elementary landscape-geochemical system contaminated during the accident at the Chernobyl NPP // Applied Geochemistry, 2019. – № 109. – URL https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104394 (дата обращения 2019-12-15).
8. Korobova E. M., Romanov S. L. A Chernobyl ^{137}Cs contamination study as an example for the spatial structure of geochemical fields and modeling of the geochemical field structure // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2009. – № 99. – P. 1–8.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОРИЯ И УРАНА В УГЛЯХ И УГЛЕНОСНЫХ ПОРОДАХ МЕТОДОМ ИСП-МС: ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ В ДВГИ ДВО РАН

М. Г. Блохин, Н. В. Зарубина, И. Ю. Чекрыжов

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН
Владивосток, Россия, blokhin@fegi.ru

ICP-MS DETERMINATION OF TORIUM AND URANIUM IN COALS AND COAL-BEARING ROCKS

M. G. Blokhin, N. V. Zarubina, I. Yu. Chekryzhov

Far East Geological Institute FEB RAS
Vladivostok, Russia, blokhin@fegi.ru

The prospects of using the ICP-MS method for the analysis of thorium and uranium in coals and coal-bearing rocks with the accuracy required for geochemical studies were shown based on the metrological assessment and comparison of experimental data obtained in three independent laboratories. Several techniques for the quantitative determination of the mentioned chemical elements in the considered geological objects by the ICP-MS method, including certified reference materials analysis of coal fly ash (ZUK-2), brown coal ash from Azeiskoye deposit (ZUA-1), and bituminous coal CLB-1 of the US Geological Survey, were described. The used sample preparation analytical schemes allowed us to achieve detection limits below n • 10^{-3} ppm.

Введение

В работе рассматривается возможность количественного определения тория и урана в углях и угленосных породах с использованием метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). Хотя для анализа мы используем конкретные изотопы – ^{232}Th и ^{238}U, с последующим пересчетом на общее содержание элементов, хотелось бы подчеркнуть, что говоря о количественном определении, мы подразумеваем определение химических элементов в пробах, а не их изотопных отношений.

Метод ИСП-МС в элементном анализе геологических образцов [8, 11], в том числе и при определении тория и урана в угольных материалах [12] используется уже не один десяток лет. Тем не менее мы хотели бы обозначит аналитические аспекты применения ИСП-МС в данном направлении, основываясь на многолетнем опыте применения этого метода.

Торий в природе представлен несколькими радиоактивными изотопами, но именно ^{232}Th имеет распространенность близкую к 100 %, с периодом полураспада $T_{1/2} = 1{,}4 \cdot 10^{10}$ лет [1]. Данный изотоп подвержен альфа-распаду. Родоначальник радиоактивного семейства тория.

Уран имеет три природных изотопа: ^{238}U (99,275 %), ^{235}U (0,720 %) и ^{234}U (0,005 %) [1]. Самый распространенный изотоп ^{238}U имеет период полураспада $T_{1/2} = 4{,}5 \cdot 10^{9}$ лет. Является исходным изотопом в ряду радиоактивного семейства называемого рядом радия. Также, как и ^{232}Th, подвержен альфа-распаду.

Среднее содержание урана и тория в осадочных горных породах составляет 3,4 г/т и 7,7 г/т, соответ-

ственно [1]. В отличие от кларка для верхней части кон-тинентальной земной коры, осадочные горные породы несколько более обогащены ураном, но обеднены торием. По данным А. П. Виноградова, в осадочных породах содержится 3,2 г/т U и 11 г/т Th при кларках для земной коры 2,5 г/т и 13 г/т, соответственно.

Что касается углей, то в целом они характеризуются невысокими уровнями накопления урана и тория, сопоставимыми с кларковыми содержаниями этих элементов. По данным Я. Э. Юдовича с соавторами [6] среднее содержание урана (кларк) в углях составляет 3,6 г/т, тория для бурых углей – 6,3 г/т, каменных – 3,5 г/т. В то же время были открыты угольные месторождения и бассейны, такие как Итатское и Уртуйское месторождения в Сибири, угли Раковской впадины в Приморье, угли месторождений Южной и Северной Дакоты в США и другие, аномально обогащенные ураном, а иногда и торием.

Необходимость количественного определения тория и урана в углях и угленосных породах может быть связана с несколькими факторами, такими как решение геохимических задач (в данном случае особый интерес представляет изучение их отношений), а также установление возможной радиотоксичности продуктов сжигания и переработки углей. Так, по Я. Э. Юдовичу и М. П. Кетрис [7] среднее содержание урана и тория в золе углей составляет 16 г/т и 21 г/т, соответственно, но для некоторых месторождений может достигать сотен и даже тысяч г/т.

Радиоактивные элементы в основном связаны с минеральной частью угля, за исключением аномальных по содержанию урана углей, где он может быть связан с органической частью. После сжигания углей, концентрация радиоактивных элементов в золе как правило повышается в несколько раз. В зависимости от марочного состава, зольности и полноты озоления угля, коэффициент концентрирования может составлять величину 3–4, но может достигать и значений порядка 10 [2]. В среднем торий и уран в углях дают показатель радиоактивности не превышающий 20 Бк/кг. Это значит, что такой материал абсолютно безопасен для окружающей среды. Но данные показатели могут колебаться в широких пределах. В некоторых месторождениях они достигают 1700–3600 Бк/кг [2]. Помимо радиоактивных тория и урана, а также продуктов их распада, в углях может накапливаться долгоживущий радиоактивный изотоп ^{40}K. Такой уголь считается непригодным для использования в энергетике, но он может стать сырьем для получения урана, тория, полония и других радиоактивных элементов [4].

К лабораторным методам количественного определения тория и урана в геологических пробах можно отнести: альфа-бета-гамма-радиометрические методы, радиохимические методы, люминесцентный метод определения урана и колориметрический метод определения урана и тория, рентгено-флюоресцентный спектральный метод, а также ряд модификаций инструментального нейтронно-активационного метода анализа (ИНАА). Данные методы являются как разрушающими, так и неразрушающими, имеют различные пределы обнаружения (вплоть до 10^{-8}–10^{-10} % для метода ИНАА в модификации, основанной на регистрации природного и наведенного α-, β- и γ-излучения и осколков деления на различных типах детекторов). Методы отличаются по трудоемкости и времени выполнения анализа. В нашей работе мы хотели бы более подробно остановиться на методе ИСП-МС для количественного определения тория и урана в геологических образцах на примере углей и угленосных пород.

Материалы и методы

Метод ИСП-МС в настоящее время очень часто используется в современной аналитической практике при определении микроэлементов, включая Th и U, в различных типах геологических образцов: горных породах, в том числе углях и продуктах их переработки, минералах, почвах, природных водах, рассолах, т. е. объектах с различными по составу и уровнями содержаний матричных элементов. Метод позволяет проводить анализ как напрямую, из твердой фазы образца, используя технику лазерного пробоотбора (ЛА-ИСП-МС), так и после предварительной подготовки проб, связанной с переводом исследуемых компонентов в раствор.

В случае магнитно-секторной мультиколлекторной ИСП-МС высокого разрешения возможно проводить определение короткоживущих изотопов ^{229}Th, ^{230}Th, ^{233}U, ^{234}U, ^{235}U, ^{236}U, а также их отношений. Но для повышения точности определения, особенно изотопов Th, наряду с ИСП-МС лучше использовать термоионизационную масс-спектрометрию (ТИМС) [9, 10]. Однако данная техника является очень дорогостоящей и не так много лабораторий могут позволить себе ее применение.

В целом метод ИСП-МС, даже в случае использования квадрупольного масс-анализатора, позволяет достичь низких пределов обнаружения Th и U в геологических пробах (на уровне 10^{-8} % и ниже), с высокой точностью определения. При этом надо помнить, что метод ИСП-МС является многоэлементным и параллельно позволяет определять около 50 элементов Периодической системы химических элементов.

В данной работе ИСП-МС анализ проб углей и угленосных пород выполнялся на масс-спектрометре модели 7700x фирмы Agilent, Япония в ЦКП «Приморский центр локального элементного и изотопного анализа» Дальневосточного геологического института ДВО РАН, г. Владивосток. Данный инструмент является квадрупольным ИСП-МС спектрометром и может использоваться в режиме коррекции фона с помощью наполняемой гелием октопольной столкновительной ячейки с дискриминацией по энер-

гии (ORC технология). Часть проб была также предварительно проанализирована методом ИСП-МС в Институте проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН г. Черноголовка (исполнитель В. К. Карандашев) и ИНАА на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т ИШЯТ Томского политехнического университета (ТПУ) (исполнитель А. Ф. Судыко).

Представленные методики подготовки проб также использовались в работе [3].

Для пробоподготовки исследуемых образцов углей и угленосных пород (кроме кислых) нами был выбран способ открытого кислотного разложения с использованием азотной, хлорной и фтористоводородной кислот. При таком разложении происходит разрушение органической матрицы и силикатной составляющей и выделение Si в виде летучего фторида кремния SiF_4, что приводит к его фактическому удалению из пробы.

Навески проб массой 0,05 г помещали в тефлоновые бюксы, добавляли 2 см^3 HNO_3, 1 см^3 $HClO_4$ и давали выстояться 12 часов при комнатной температуре. Затем содержимое бюксов упаривали при температуре 140–150 °С до влажных солей. Эту процедуру выполняли дважды. К оставшейся части вещества приливали 2 см^3 HNO_3, 0,5 см^3 $HClO_4$ и 2 см^3 HF («suprapur», Merck), упаривали до состояния влажных солей. Для удаления избытка HF и разрушения образовавшихся в ходе разложения пробы фторсодержащих солей выполняли двукратное упаривание аналита с азотной кислотой (1 : 1). После этого в бюксы вносили по 10 см^3 10 % HNO_3, нагревали до перехода солей в растворенную форму. Полученные растворы переносили в полипропиленовые мерные колбы объемом 50 см^3 и доводили их деионизированной водой (тип I) до метки с добавлением следов HF для подавления возможных процессов гидролиза. Перед ИСП-МС анализом растворы проб разбавляли таким образом, чтобы конечный фактор разбавления составил 2500.

Для выполнения ИСП-МС анализа золы углей и кислых угленосных горных пород использовалась методика, заключающаяся в сплавлении проб с метаборатом лития. Образцы угольных материалов предварительно озоляли при температуре 550 ± 10 °С. Навески массой 0,05 г золы угля сплавляли в платиновых тиглях с метаборатом лития в пропорции 1 : 3 при температуре 1050 °С в течение 15 минут. Сплав растворяли в 5 % азотной кислоте, упаривали до минимального объема, обрабатывали плавиковой кислотой с последующим нагреванием для удаления кремния и бора в виде летучих фторидных соединений до влажных солей. Далее проводили обработку концентрированной HNO_3 с упариванием до влажных солей, приливали по 10 мл 20 % HNO_3 и нагревали до растворения солей. Полученные растворы переносили в мерные полипропиленовые колбы вместимостью 50 см^3 и доводили их до метки деионизированной водой (тип I) с добавлением следов HF.

Все используемые для выполнения химической пробоподготовки реактивы были высокой степени чистоты. Азотную кислоту марки «осч» перегоняли на установке перегонки без кипения фирмы MileStone, плавиковая, хлорная кислоты и метаборат лития были квалификации «suprapur». Деионизированную воду с удельным сопротивлением 18,2 MΩ/см получали с помощью системы очистки воды MiliQ, Millipore. Для градуировки масс-спектрометра использовались многоэлементные стандартные растворы Multi-element Calibration Standard 1 (№ 8500-6944) и Multi-element Calibration Standard 2A (№ 8500-6940) (Agilent, Япония), последовательно разбавленные весовым методом до значений концентраций Th и U в них соответствующим определяемым в анализируемых пробах.

В качестве объекта исследования выступали угли и угленосные породы из Раковской угленосной впадины, расположенной вблизи г. Уссурийска (Приморский край). Данная впадина включает буроугольное месторождение, а также дополнительно характеризуется рудопроявлениями урана, германия и РЗЭ, залегающими как в угольных пластах, так и в вмещающих их слаболитифицированных кайнозойских отложениях, а также в кристаллических породах фундамента и обрамлениях впадины [5]. Для контроля точности анализа использовался стандартный образец битуминозного угля CLB-1 Геологической службы США, с рекомендованными значениями содержания в нем Th и U в количестве 1,4 г/т и 0,55 г/т соответственно, а также стандарты состава золы уноса угля КАТЭКа ГСО 9237-2008 (ЗУК-2) и золы бурого угля Азейского месторождения ГСО 7177-95 (ЗУА-1).

Результаты и их обсуждение

Говоря о тории и уране, как объектах для ИСП-МС количественного определения в геологических образцах, можно отметить следующее. В качестве аналитических масс для измерения обычно выбирают самые распространенные и стабильные их природные изотопы: ^{232}Th (100 %) и ^{238}U (99,275 %). Торий и уран более чем на 95 % ионизируются в аргоновой плазме, обеспечивая достаточно высокую чувствительность их определения. Первый потенциал ионизации тория составляет 6,95 эВ, для урана – 6,1 эВ.

Указанные изотопы относятся к тяжелым массам и существует не так много интерферирующих ионов, способных значительно повлиять на данные аналиты и эти ионы достаточно специфичны. Изобарных наложений на данных массах нет. К полиатомным интерференциям можно отнести: для ^{232}Th – $SnSn^+$, $OsAr^+$, $PtAr^+$, $PtCl^+$ и $AuCl^+$, для ^{238}U – $SnSn^+$, ThH^+, $PtAr^+$, $AuAr^+$, $HgAr^+$, $PtCl^+$, $AuCl^+$, $HgCl^+$ и $TlCl^+$. Формирующие эти наложения химические элементы обычно

содержаться в очень низких, за редким исключением, количествах в геологических объектах и обычно их влиянием можно пренебречь. К тому же энергии устойчивости данных ионов достаточно малы, и они практически полностью диссоциируют в аргоной плазме. Таким образом, сложности при ИСП-МС определении тория и урана могут возникнуть при их анализе на следовом уровне в отдельных матрицах, таких как рудные концентраты или некоторые минеральные фазы.

Вид форм нахождения тория и урана в геологических объектах с точки зрения их химической устойчивости и способности к переходу в растворенную форму обычно не вызывает затруднений. Их ионные формы достаточно стабильны в HNO_3 растворах, но следует обращать внимание на возможность сопутствующих сорбционных процессов в случае протекания параллельных реакций матричных ионов во время химической пробоподготовки.

С использованием описанных методик подготовки проб нами были получены пределы обнаружения тория и урана на уровне 10^{-3} г/т. ИСП-МС определение тория и урана в углях, их золе и угленосных породах Раковского месторождения, а также сопоставление полученных данных с ИНАА, показало аномальное обогащение углей ураном, средние содержания которого в золе угля составили 540 г/т (сечение 1) и 62 г/т (сечение 2). Содержание тория в отдельных пробах золы углей достигало 117 г/т, а в золе высокозольного угля – 182 г/т. В алевролитах было установлено содержание тория от 4 г/т до 45 г/т и урана в диапазоне 1–16 г/т. Для гранитов обрамления данного месторождения были найдены содержания тория и урана 36 г/т и 256 г/т соответственно.

Результаты ИСП-МС анализа тория и урана (г/т) в стандартных образцах состава угля и золы угля (Таблица 1) показали возможность использования выбранных способов химической пробоподготовки и инструментальных параметров для количественного определения рассматриваемых элементов в углях и угленосных породах.

В целом, установленные содержания тория и урана, а также их соотношения в углях и угленосных породах, дали возможность охарактеризовать природу поступления этих элементов и РЗЭ, в угли Раковского месторождения. Первый анализ полученных данных был сделан в работе [5].

Заключение

В работе была рассмотрена аналитическая схема количественного определения тория и урана в углях и угленосных породах с использованием метода ИСП-МС. Получены результаты ИСП-МС анализа тория и урана в 3 стандартных образцах утвержденного типа состава золы уноса угля КАТЭКа ГСО 9237-2008 (ЗУК-2), золы бурого угля Азейского месторождения ГСО 7177-95 (ЗУА-1) и битуминозного угля CLB-1 Геологической службы США. Результаты дополняют представленные в паспортах данные по этим элементам, так как не все значения аттестованы, а имеют статус рекомендованных. Это касается стандартов CLB-1 и ЗУА-1. Для выбора способа перевода проб в растворенную форму было проведено сопоставление ИСП-МС результатов анализа для проб углей и угленосных пород после различных способов химической пробоподготовки: методики открытого кислотного разложения и сплавления с метаборатом лития. Выполнено сравнение полученных данных по ИСП-МС и ИНАА методам. Все результаты обработаны метрологически, и показано их допустимое расхождение.

Работа выполнена при финансовой поддержки РФФИ (проект № 21-55-53013).

Таблица 1. Результаты ИСП-МС определения элементов (г/т) в стандартных образцах

Элементы	CLB-1		ЗУК-2		ЗУА-1	
	найдено	паспортное значение	найдено	паспортное значение	найдено	паспортное значение
Th	1,24±0,17	1,4	7,08±0,50	7±0,9	45,4±4,4	45
U	0,47±0,04	0,55	2,96±0,36	3,1±0,4	15,1±1,0	15

Литература

1. Арбузов С. И. Геохимия радиоактивных элементов / С. И. Арбузов, Л. П. Рихванов. – 2-е изд. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 300 с.
2. Арбузов С. И., Машенькин В. С. Радиоактивные элементы в каустобиолитах Северной Азии // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы V Международной конференции, г. Томск. – Томск: STT, 2016. – С. 67–74.
3. Зарубина Н. В., Блохин М. Г., Остапенко Д. С., Чекрыжов И. Ю., Арбузов С. И., Судыко А. В. Аналитические подходы к количественному определению содержаний химических элементов в углях и углистых породах с использованием методов ИСП-МС и ИНАА // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 99–112.

4. Крылов Д. А., Сидорова Г. П. Оценка содержания радиоактивных элементов в углях и продуктах их сжигания // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2015. – № 7. – С. 369–376.
5. Чекрыжов И. Ю., Середин В. В., Арбузов С. И. Редкоземельные элементы и уран в углях Раковской впадины, Южного Приморья // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы V Международной конференции, г. Томск. – Томск: STT, 2016. – С. 703–706.
6. Юдович Я. Э., Кетрис М. П., Мерц А. В. Элементы-примеси в ископаемых углях. – Л.: Наука, 1985. – 239 с.
7. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Ценные элементы-примеси в углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 538 с.
8. Brenner I. B., Taylor H. E. A Critical Review of Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry for Geoanalysis, Geochemistry, and Hydrology. Part I. Analytical Performance // Critical Reviews in Analytical Chemistry, 1992. – V. 23. – № 5. – P. 355–367.
9. Chiang H.W., Lu Y., Wang X., Lin K., Liu X. Optimizing MC-ICP-MS with SEM protocols for determination of U and Th isotope ratios and ^{230}Th ages in carbonates // Quaternary Geochronology, 2019. – V. 50. – P. 75–90.
10. Hoffmann D. L., Prytulak J., Richards D. A., Elliott T., Coath C. D., Smart P. L., Scholz D. Procedures for accurate U and Th isotope measurements by high precision MC-ICPMS // International Journal of Mass Spectrometry, 2007. – V. 264. – № 2–3. – P. 97–109.
11. Parami V. K., Sahoo S. K., Yonehara H., Takeda S., Quirit L. L. Accurate determination of naturally occurring radionuclides in Philippine coal-fired thermal power plants using inductively coupled plasma mass spectrometry and γ-spectroscopy // Microchemical Journal, 2010. – V. 95. – № 2. – P. 181–185.
12. Prohaska T., Hann S., Latkoczy C., Stingeder G. Determination of rare earth elements U and Th in environmental samples by inductively coupled plasma double focusing sectorfield mass spectrometry (ICP-SMS) // Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 1999. – V. 14. – № 1. – P. 1–8.

ФОРМЫ МИГРАЦИИ УРАНА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ НА УЧАСТКЕ ШЛАМОХРАНИЛИЩА НИЗКОУРОВНЕВЫХ РАО

А. Е. Богуславский[1], О. С. Шварцева[1], О. Гаськова[1], А. В. Сафонов[2]

[1]Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН
Новосибирск, Россия, boguslav@igm.nsc.ru
[2]Институт физической химии и электрохимии РАН
Москва, Россия alexeysafonof@gmail.com

FORMS OF URANIUM MIGRATION IN UNDERGROUND WATERS AT THE SITE OF A LOW-LEVEL RW SLUDGE STORAGE FACILITY

A. Boguslavskyi[1], O. Shvartseva[1], O. Gaskova[1], A. Safonov[2]

[1]V. S. Sobolev Institute of geology and mineralogy SB of RAS, boguslav@igm.nsc.ru
[2]Frumkin Institute of Physical Chemistry RAS, alexeysafonof@gmail.com

Based on the experimental data, the calculation of the uranium species in the groundwater of the low-level radioactive waste storage area was carried out. The formation of colloidal forms of uranium depends on the pH – Eh parameters. It was shown that at elevated concentrations of the nitrate ion, uranium(IV) is oxidized to uranium(VI), while the content of colloidal forms is significantly reduced.

Введение

Деятельность предприятий по добыче урановой руды и ее переработке может приводить к неконтролируемой миграции тяжелых металлов, радиоактивных элементов и других токсичных соединений и загрязнению подземных вод при попадании в водозаборы и открытые водоемы. Особая проблема – загрязнение подземных вод естественными актинидами - ураном, торием, ввиду их длительного периода полураспада и высокой токсичности.

Значительный вклад в загрязнение подземных вод вносят предприятия, имеющие большие объемы твердых отходов в виде рудных отвалов, хвосто- и шламохранилищ, образующих на поверхности потенциально опасные для окружающей среды объекты. Длительное время за счет фильтрации атмосферных осадков через стенки и дно хранилищ в подземные воды верхних водоносных горизонтов попадают тяжелые металлы, анионы кислот (сульфаты, нитраты) и радиоактивные элементы [1, 2]. В описанных случаях, повышенная миграция урана и

загрязнение подземных вод определяется макрокомпонентами фильтрата, обеспечивающими высокий ОВП (нитрат, сульфат), комплексообразованием уранил-иона, коллоидным и псевдоколлоидным переносом с частицами глин и оксидов металлов (железо, марганец, хром). Помимо этого, известна роль подземной микробиоты в иммобилизации урана за счет процессов энзиматического восстановления, сорбции на биопленках [3], биоминерализации [4].

Объектом данного исследования являлись пластовые воды, отобранные с глубин 5–10 м вблизи шламохранилища Новосибирского завода химконцентратов (НЗХК) – одного из ведущих мировых производителей ядерного топлива для АЭС и исследовательских реакторов России и зарубежных стран, также производителя металлического лития и его солей. Завод начал работу в 1950–1951 г. и с этого момента накопил в шламохранилищах значительные объёмы твердых отходов низкого уровня активности. За более чем 65-летнюю историю развития предприятия, происходило постоянное загрязнение подземных вод в районе шламохранилищ сульфат- и нитрат-анионами, ураном и рядом тяжелых металлов. Так как сформированный отстойник – фильтрационного типа, поэтому гидроизоляция дна и бортов не предусматривалась. Концентрация урана в жидкой фазе шламов варьирует в зависимости от годового сезона в интервале 2–4 мг/л. Многолетними наблюдениями отмечается фильтрация загрязненных вод в первый водоносный горизонт. Загрязненные воды смешиваются с природными, в результате этого происходит многократное разбавление. За границей промплощадки НЗХК содержания загрязняющих элементов в водах не превышают действующих нормативов (ПДК).

Объект и методы исследования

Объектом исследования являются грунтовые воды, отобранные на участке размещения хвостохранилищ с низкоуровневыми РАО, представленными преимущественно ураном и его дочерними элементами.

Вмещающие породы на участке представлены среднечетвертичными отложениями аллювиально-озерного генезиса, которые можно разделить на три пачки. В основании выделяется пачка суглинков, вскрытой мощностью 3–9 м. Их особенностью является очень слабая водопроницаемость (Кф = < 0,001 м/сут). Выше залегает пачка, представленная переслаиванием желтовато-бурого суглинка с супесями и мелкозернистыми песками. Супеси и пески этой пачки являются наиболее водопроницаемыми (Кф = 1,5 м/сут) грунтами, к ним приурочен основной поток грунтовых вод - первый водоносный горизонт. Верхняя пачка отложений представлена лессовидными желтовато-бурыми суглинками. Их мощность составляет 8–15 м и достигает максимальных значений на водораздельных участках, (Кф = 0,01–0,1 м/сут). В минеральном составе отложений преобладают кварц, полевые шпаты, кальцит, магнетит, ильменит. В тонкодисперсной фракции (> 0,001 mm) установлены кварц, плагиоклаз, калиевый полевой шпат, слюда, хлорит, кальцит, в меньшей степени содержится амфибол и смектит. Общее содержание глинистых минералов не превышает 3 %.

Пробы воды были отобраны из наблюдательных скважин в летний период с использованием скважинных насосов в стерильные пластиковые бутыли объемом 1,5 л. Каскадную фильтрацию проводили в полевых условиях в анаэробном боксе в азотной атмосфере сразу после отбора пробы. Для фильтрации использовали 5 мл шприцы с насадками, содержащими мембраны производства ОАО «Владипор» с размером пор 4,5–2,4, 1,2, 0,45 и 0,05 мкм. После каждой стадии фильтрации состав фильтрата анализировали методом ICP-MS.

Определение значений Eh и pH проводили *in situ* с помощью pH-метра-иономера АНИОН-4100» (Россия), снабженного комбинированными электродами. Концентрацию анионов и катионов измеряли методом CGE Capillary electrophoresis system Capel-105M, LUMEX instruments (Russia). Измерение концентрации урана и других элементов проводили с использованием ICP-Ms анализатора Agilent 7800 ICP-MS.

Для расчета форм миграции урана использованы база термодинамических данных llnl и PSINA (PSI/Nagra Chemical Thermodynamic Database 12/07). Учитывались следующие формы U(IV–VI): U^{+4}, $(U(OH)_4)$, $U(CO_3)_4^{-4}$, UOH^{+3}, $U(CO_3)_5^{-6}$, $U(SO_4)_2$, USO_4^{+2}, UCl^{+3}, UNO_3^{+3}, $U(NO_3)_2^{+2}$, UO_2^{+}, $UO_2(CO_3)_3^{-5}$), UO_2^{+2}, $(UO_2(CO_3)_2^{-2}$, $UO_2(CO_3)_3^{-4}$, UO_2CO_3, $UO_2(OH)_2$, UO_2OH^{+}, $UO_2(OH)_3^{-}$, UO_2SO_4, $(UO_2)_3(CO_3)_6^{-6}$, $UO_2(SO_4)_2^{-2}$, $(UO_2)_3(OH)_5^{+}$, $(UO_2)_2(OH)_2^{+2}$, UO_2Cl^{+}, $UO_2NO_3^{+}$, $(UO_2)_3(OH)_7$, $(UO_2)_4(OH)_7^{+}$, $(UO_2)_3(OH)_4^{+2}$, UO_2Cl_2, $(UO_2)_3(OH)_5CO_2^{+}$, $(UO_2)_2OH^{+3}$, $(UO_2)_3O(OH)_2(HCO_3)^{+}$, $UO_2(OH)_4^{-2}$, UO_2SO_3, $(UO_2)_{11}(CO_3)_6(OH)_{12}^{-2}$.

Обсуждение и результаты

Для детального исследования использованы три пробы подземных вод отобранных из наблюдательных скважин с глубины 7–9 м на разном расстоянии от объекта загрязнения (шламохранилища). Образец 1 характеризует естественный фон данного участка, она находится на удалении более 300 метров выше по потоку от отстойника. Образец 3 – это вода из скважины, находящейся на расстоянии ~ 10 м от отстойника, где разбавление техногенных вод грунтовыми проявлено минимально. Образец 2 отобран на расстоянии ~ 150 m от отстойника. Кратность разбавления по хлорид- и нитрат ионам относительно образца 3 составляет около 5,5 раз.

Незагрязненные грунтовые воды являются пресными (минерализация не более 0,47 г/л) гидрокар-

бонатно-кальциевыми. В пробах, отобранных в зоне загрязнения, образцы 2 и 3 наблюдалось заметное увеличение минерализации по сравнению с фоновыми значениями (образец 2 – 3,83 г/л, образец 3 – 14,9 г/л) за счет основных макрокомпонентов – нитрат-, сульфат-, хлорид-ионов, кальция и натрия. Воды образца 2 содердат SO_4 – NO_3 – Na – Mg, а воды образца 3 – NO_3 – Cl – SO_4 – Na – Ca. Это означает, что на расстоянии 150 метров от скважины меняется даже химический тип вод. Содержание уранил-ионов в пробе из скважины, ближней к зоне загрязнения, превышало фоновые значения в 2000 раз (1,58 мг/л). Стоит добавить, что в пробе из загрязненных скважин наблюдается превышение значений ПДК по металлам: в частности, цинку, марганцу, железу и меди. Содержание кислорода в пробах варьировалось в большом диапазоне, характерном как для аэробно-микроаэрофильных так и анаэробных условий.

В исследованных пробах, отобранных из скважин вблизи шламохранилища, обнаружен уран в концентрациях до 1,58 мг/л (Табл. 1). Каскадная фильтрация проб воды из скважин 2 и 3 в анаэробном боксе в полевых условиях позволила установить распределение размеров основных частиц, с которыми может быть связана миграция урана.

Химические элементы в подземных водах могут мигрировать в виде взвеси (0,1 мкм), коллоидов (1–100 нм) и истинных растворов (~ 1 нм). Принято считать, что взвеси практически отсутствуют в подземных водах, коллоиды играют подчиненную роль,

Таблица 1. Химический состав исследуемых проб

Образец/параметр	Образец 1 (фон)	Образец 2 (среднее загрязнение)	Образец 3 (максимальное загрязнение)
pH	7,01	6,80	6,97
Eh, mV	–190	–28	90
TDS, г/л	0,47	3,83	14,91
Cl- , мг/л	11	590	3200
HCO3-, мг/л	549	161	180
NO3- ,мг/л	12,2	1124	6169
SO42-,мг/л	30	1769	470
Ca, мг/л	123	56	1436
Mg, , мг/л	33,2	114,4	65,5
Na, мг/л	0,24	685	1249,8
Mn, мг/л	0,40	2,3	1,29
Fe, мг/л	0,01	10,7	< 0,01
U, мг/л	0,002	0,0008	1,58

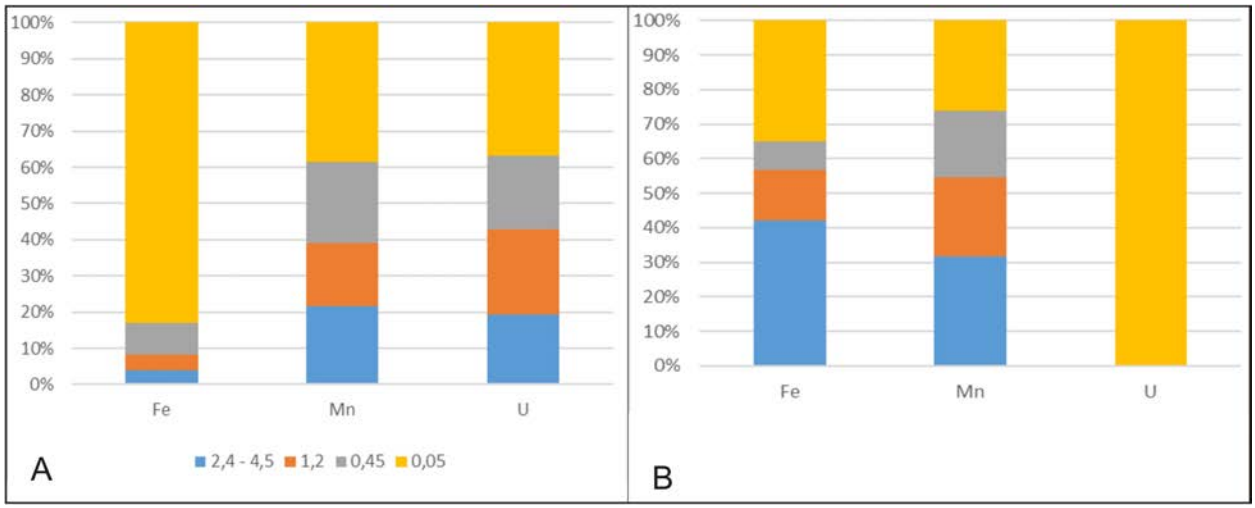


Рис. 1. Содержание элементов в разных фракциях (% от исходной концентрации) после каскадной фильтрации проб пластовой жидкости: А – образец 2, В – образец 3. Внизу указан диаметр пор фильтров (мкм)

а преобладают истинно растворенные формы. Исключение составляют такие элементы как Si, Al, Mn, Fe, U, Th и некоторые другие.

В воде образца 3 обнаружено более 6 г/л нитрат-ионов, способствующих слабо окислительной обстановке (Eh 90 mV) и нахождению урана преимущественно в виде карбонатных комплексов иона-уранила (Pic 1 фракция < 0,05 μm,), в которой он легко мигрирует. Для железа и марганца был характерен перенос преимущественно в виде коллоидов, причем доля крупной фракции 2,4–4,5 μm составляет 30–40 %. Для железа это объясняется образованием нерастворимой (гидро)окиси Fe (III), а для марганца вывод не так очевиден. Согласно расчетам (табл. 2), он должен присутствовать в виде Mn^{2+} and $MnSO_4$(aq), а твердых фаз не образуется. Более того, известно, что для осаждения марганца из загрязненных вод применяют аэрационное окисление двухвалентных соединений до нерастворимых форм высшей валентности с последующим их отделением. Таким образом, на данный момент мы можем предположить только то, что концентрирующие Mn коллоиды – это органо-минеральные соединения.

В воде образца 2 с содержанием нитрата около 1 г/л (Eh – 28 mV), картина противоположная. Железо находится в виде растворенных форм Fe (II) – Fe^{+2}, $FeHCO_3^+$ and $FeSO_4$(aq), а марганец в растворе (40 %) и во всех фракциях коллоидов. Обратим внимание, что в этих водах концентрация марганца (2,3 мг/л) гораздо выше ПДК. Согласно расчетам, в зоне 2 на удалении десятков метров от шламохранилища, уран в растворе находится преимущественно в виде $U(OH)_4$(aq), и в виде истинных- и псевдоколлоидов UO_2(am).

Нитраты, которыми богаты растворы of образцов 2 и 3, поддерживают в нейтральных грунтовых водах территории НЗХК аэробные условия, препятствуя удалению урана. При этом влияние на подвижность урана проявляется даже при уменьшении количества NO_3^- с 6169 mg/L до 1124 мг/л: (a) уран меняет степень окисления с U (VI) to U (IV); (b) содержание закисного Fe (II), потенциального донора

Таблица 2. Основные формы миграции элементов в грунтовых водах полученные по результатам термодинамического моделирования

Sample 1, Eh –190 mV, pH 7		Sample 2, Eh –28 mV, pH 6,8		Sample 3, Eh 90 mV, pH 6,97	
Fe(2)	**$1{,}791 \cdot 10^{-7}$ total**	**Fe(2)**	**$1{,}916 \cdot 10^{-4}$ total**	**Fe(2)**	**$1{,}789 \cdot 10^{-7}$ total**
$FeHCO_3^+$	$1{,}221 \cdot 10^{-7}$	Fe^{+2}	$1{,}174 \cdot 10^{-4}$	Fe^{+2}	$1{,}228 \cdot 10^{-7}$
Fe^{+2}	$5{,}063 \cdot 10^{-8}$	$FeHCO_3^+$	$5{,}211 \cdot 10^{-5}$	$FeHCO_3^+$	$4{,}586 \cdot 10^{-8}$
$FeCO_3$	$5{,}398 \cdot 10^{-9}$	$FeSO_4$	$2{,}004 \cdot 10^{-5}$	$FeSO_4$	$5{,}715 \cdot 10^{-9}$
Fe(3)	**$9{,}001 \cdot 10^{-16}$ total**	**Fe(3)**	**$3{,}672 \cdot 10^{-10}$ total**	$FeCl^+$	$2{,}640 \cdot 10^{-9}$
$Fe(OH)_3$	$7{,}288 \cdot 10^{-16}$	$Fe(OH)_3$	$2{,}590 \cdot 10^{-10}$	$FeCO_3$	$1{,}622 \cdot 10^{-9}$
$Fe(OH)_2^+$	$1{,}691 \cdot 10^{-16}$	$Fe(OH)_2^+$	$1{,}075 \cdot 10^{-10}$	**Fe(3)**	**$2{,}042 \cdot 10^{-10}$ total**
Mn(2)	**$7{,}281 \cdot 10^{-6}$ total**	**Mn(2)**	**$4{,}187 \cdot 10^{-5}$ total**	$Fe(OH)_3$	$1{,}577 \cdot 10^{-10}$
Mn^{+2}	$6{,}500 \cdot 10^{-6}$	Mn^{+2}	$3{,}364 \cdot 10^{-5}$	$Fe(OH)_2^+$	$4{,}596 \cdot 10^{-11}$
$MnCO_3$	$4{,}273 \cdot 10^{-7}$	$MnSO_4$	$7{,}171 \cdot 10^{-6}$	**Mn(2)**	**$2{,}348 \cdot 10^{-5}$ total**
$MnHCO_3^+$	$2{,}274 \cdot 10^{-7}$	$MnCl^+$	$3{,}834 \cdot 10^{-7}$	Mn^{+2}	$1{,}995 \cdot 10^{-5}$
$MnSO_4$	$1{,}230 \cdot 10^{-7}$	$MnCO_3$	$2{,}279 \cdot 10^{-7}$	$MnSO_4$	$1{,}445 \cdot 10^{-6}$
U(4)	**$4{,}201 \cdot 10^{-5}$ total**	$MnNO_3^+$	$2{,}215 \cdot 10^{-7}$	$MnCl^+$	$1{,}253 \cdot 10^{-6}$
$U(OH)_4$	$4{,}201 \cdot 10^{-5}$	$MnHCO_3^+$	$2{,}167 \cdot 10^{-7}$	$MnNO_3^+$	$5{,}278 \cdot 10^{-7}$
U(6)	**$6{,}807 \cdot 10^{-11}$ total**	$MnOH^+$	$3{,}196 \cdot 10^{-9}$	$MnCO_3$	$1{,}624 \cdot 10^{-7}$
$UO_2(CO_3)_3^{-4}$	$4{,}052 \cdot 10^{-11}$	**U(4)**	**$4{,}032 \cdot 10^{-5}$ total**	$MnHCO_3^+$	$1{,}080 \cdot 10^{-7}$
$UO_2(CO_3)_2^{-2}$	$2{,}630 \cdot 10^{-11}$	$U(OH)_4$	$4{,}032 \cdot 10^{-5}$	**U(4)**	**$1{,}981 \cdot 10^{-9}$ total**
UO_2CO_3	$7{,}639 \cdot 10^{-13}$	**U(6)**	**$1{,}684 \cdot 10^{-6}$ total**	$U(OH)_4$	$1{,}981 \cdot 10^{-9}$
$UO_2(OH)_2$	$4{,}781 \cdot 10^{-13}$	$UO_2(CO_3)_2^{-2}$	$8{,}494 \cdot 10^{-7}$	**U(6)**	**$4{,}201 \cdot 10^{-5}$ total**
S(–2)	**$3{,}805 \cdot 10^{-5}$ total**	$UO_2(CO_3)_3^{-4}$	$4{,}590 \cdot 10^{-7}$	$UO_2(CO_3)_3^{-4}$	$2{,}311 \cdot 10^{-5}$
H_2S	$2{,}449 \cdot 10^{-5}$	$UO_2(OH)_2$	$1{,}299 \cdot 10^{-7}$	$UO_2(CO_3)_2^{-2}$	$1{,}569 \cdot 10^{-5}$
HS^-	$1{,}356 \cdot 10^{-5}$	UO_2CO_3	$9{,}090 \cdot 10^{-8}$	$(UO_2)_2CO_3(OH)_3^-$	$1{,}177 \cdot 10^{-6}$
S(6)	**$2{,}743 \cdot 10^{-4}$ total**	$(UO_2)_2CO_3(OH)_3^-$	$7{,}597 \cdot 10^{-8}$	$UO_2(OH)_2$	$4{,}695 \cdot 10^{-7}$
SO_4^{-2}	$2{,}358 \cdot 10^{-4}$	**S(6)**	**$6{,}976 \cdot 10^{-3}$ total**	UO_2CO_3	$3{,}347 \cdot 10^{-7}$
$CaSO_4$	$3{,}601 \cdot 10^{-5}$	SO_4^{-2}	$5{,}117 \cdot 10^{-3}$	$(UO_2)_3(CO_3)_6^{-6}$	$1{,}310 \cdot 10^{-8}$
$NaSO_4^-$	$2{,}314 \cdot 10^{-6}$	$CaSO_4$	$1{,}640 \cdot 10^{-3}$	**S(6)**	**$4{,}894 \cdot 10^{-3}$ total**
$MnSO_4$	$1{,}230 \cdot 10^{-7}$	$NaSO_4^-$	$1{,}921 \cdot 10^{-4}$	SO_4^{-2}	$3{,}075 \cdot 10^{-3}$
$ZnSO_4$	$2{,}819 \cdot 10^{-8}$	$FeSO_4$	$2{,}004 \cdot 10^{-5}$	$CaSO_4$	$1{,}345 \cdot 10^{-3}$
		$MnSO_4$	$7{,}171 \cdot 10^{-6}$	$NaSO_4^-$	$4{,}715 \cdot 10^{-4}$
		$ZnSO_4$	$6{,}645 \cdot 10^{-7}$	$MnSO_4$	$1{,}445 \cdot 10^{-6}$
				$ZnSO_4$	$1{,}564 \cdot 10^{-7}$

электронов растет с 0,01 мг/л до 10,7 мг/л. Согласно расчетам и реферативным данным [Krainov, 1991], для значительного восстановления нитратов при pH 7 нужно создать Eh ≤ 0 mV. В нашем случае такие значения характерны только для фоновых вод (образец 1). Но даже в этом случае (Eh – 190 mV) и в растворе преобладает сульфатная сера над сульфидной (Табл. 2), 3,8 • 10^{-5} H_2S total and 2,74 • 10^{-4} SO_4^{-2} total.

Заключение

В результате проделанной работы определены основные миграционные формы урана. Выявлена зависимость образования коллоидных форм урана от pH – Eh условий. При увеличении содержания нитрат иона, происходит окисление урана 4+ до урана 6+, что увеличивает его подвижность. Поэтому реабилитация участков размещения низкоуровневых РАО возможна только после удаления нитрат-иона.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН при поддержке гранта РФФИ № 20-05-00602 А.

Литература

1. Boguslavsky A. E., Gaskova O. L., Naymushina O. S., Popova N. M., Safonov A. V. Environmental monitoring of low-level radioactive waste disposal in electrochemical plant facilities in Zelenogorsk, Russia Applied Geochemistry, Vol. 119, August 2020, 104598 https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104598.
2. Olga L. Gaskova. A. E. Boguslavskii. Groundwater Geochemistry Near the Storage Sites of Low-level Radioactive Waste: Implications for Uranium Migration Procedia Earth and Planetary Science 7:288–291 DOI: 10.1016/j.proeps.2013.03.130.
3. Safonov Alexey V., Babich Tamara L., Sokolova Diyana S., Denis Grouzdev, Tourova Tatiyana P., Poltaraus Andrey B., Zakharova Elena V., Merkel Alexander Y., Novikov Alexander P., Nazina Tamara N., Microbial Community and in situ Bioremediation of Groundwater by Nitrate Removal in the Zone of a Radioactive Waste Surface Repository. Frontiers in microbiology 2018, (9)1985, 2-17, 201 https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01985.
4. Erica L.-W. Majumder, Judy D. Wall* Uranium Bio-Transformations: Chemical or Biological Processes Open Journal of Inorganic Chemistry. Vol. 7 No. 2, April 2017 10.4236/ojic.2017.72003.
5. Krainov S. R., Solomin G. A. and Zakutin V. P. Oxidation-Reduction Conditions of Nitrogen Compound Transformations in Groundwater (In the Context of Geochemical-Ecological Problems), Geokhimiya, 1991. – № 6. – P. 882–831.

БИОМОНИТОРИНГ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕКИ ЕНИСЕЙ

А. Я. Болсуновский, Д. В. Дементьев, Е. А. Трофимова, А. В. Зуева

Институт биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН
Красноярск, Россия, radecol@ibp.ru

BIOMONITORING OF RADIOACTIVE CONTAMINATION OF THE YENISEI RIVER

A. Bolsunovsky, D. Dementyev, E. Trofimova, A. Zueva

Institute of Biophysics FRC KSC SB RAS
Krasnoyarsk, Russia, radecol@ibp.ru

The long-term operation of the Mining-and-Chemical Combine (MCC) of Rosatom resulted in radioactive contamination of the Yenisei River ecosystem. Aquatic plants are an important component of water ecosystems, which can accumulate high levels of radionuclides and can be used in biomonitoring and bioassays. Results of biomonitoring suggest that at the MCC discharge site and downstream, the occurrence of chromosomal aberrations in cells of aquatic plant *Elodea canadensis* was considerably higher than in the control areas. Laboratory experiments with elodea and onion seedlings exposed to low-dose γ-radiation demonstrated an increase in the frequency of chromosomal aberrations. Thus, the existing levels of radioactive contamination of the Yenisei River floodplain may have negative effects on biota.

Введение

Многолетняя деятельность Горно-химического комбината (ГХК) Росатома привела к радиоактивному загрязнению экосистемы реки Енисей [2]. Во время экспедиционных исследований техногенные радионуклиды (включая трансурановые элементы) были зарегистрированы в пойме реки Енисей на расстоянии до 2000 км по течению от ГХК. Радиоэкологические исследования реки Енисей выявили высокое

содержание техногенных радионуклидов в биомассе гидробионтов в районах вблизи расположения ГХК [2, 3, 6]. Водные растения, повсеместно произрастающие в реке Енисей, наиболее активно накапливают техногенные радионуклиды и могут быть использованы для биомониторинга радиоактивного загрязнения [2, 3, 6]. Ранее отмечали, что что в пойменных почвах и донных отложениях реки Енисей найдены радиоактивные частицы с высокой активностью ^{137}Cs [4, 5], которые могут быть точечными источниками внешнего облучения укорененных водных растений и бентосных организмов. Для оценки токсичности факторов среды обитания часто применяется биотестирование, которое осуществляется в лабораторных условиях с использованием различных тест-систем. Водные растения, в частности *Elodea canadensis* (элодея канадская), ранее использовали не только для биоиндикации, но и для биотестирования действия малых доз ионизирующего излучения [1, 3, 5, 6]. Луковый биотест (*Allium-test*) также используется для оценки токсичности многих факторов, в том числе радиационного [9]. В мировой практике принято использовать несколько биотестов одновременно для повышения надежности полученных результатов. Поэтому оценка влияния малых доз облучения гидробионтов реки Енисей должна базироваться на данных нескольких биотестов.

Целью данного исследования является ретроспективная оценка уровня радиоактивного загрязнения реки Енисей методами биоиндикации и биотестирования.

Материалы и методы

Во время экспедиционных исследований пробы водной экосистемы реки Енисей отбирали вблизи ГХК (в районе сел Атаманово и Балчуг), а также на значительном расстоянии до 250 км от ГХК по течению реки вблизи сел Захаровка и Стрелка. Отборы проб проводили как в период работы последнего реактора ГХК, так и после его остановки в 2010 году. Контрольные пробы (с радиационной точки зрения) отбирали в районе г. Красноярска и с. Есаулово, т. е. выше по течению реки от места радиоактивных сбросов ГХК. В качестве основного объекта были массовые виды погруженных макрофитов: *Potamogeton lucens*, *Fontinalis antipyretica*, *Batrachium kauffmanii*, *Myriophyllum spicatum*, *Ceratophyllum demersum*, и *Elodea canadensis*. Для измерения удельной активности γ-излучающих радионуклидов в отобранных пробах применяли γ-спектрометр фирмы Canberra (США) со сверхчистым германиевым детектором. Обработку γ-спектров проводили с помощью программного обеспечения CANBERRA GENIE-2000 (США). Расчет удельной активности радионуклидов в пробах проводился на дату отбора проб. Дозы облучения водных растений реки Енисей рассчитывали с использованием ERICA Assessment Tool. Корни *Elodea canadensis* использовали как объект цитогенетических исследований в соответствии с описанными ранее методами [1]. Частоту хромосомных нарушений оценивали как отношение числа клеток с нарушениями к общему числу просмотренных клеток в ана-телофазе.

Побеги водного растения *Elodea canadensis* и проростки семян лука *Allium* сера использовали в лабораторных экспериментах по оценке действия малых доз γ-облучения от радиоактивных источников ^{137}Cs («горячих» частиц). Схемы экспериментов приведены на рис. 1. Побеги элодеи и проростки семян располагали на разном расстоянии от радиоактивного источника, что позволило проводить облучение растений разными дозами. По окончании экспериментов разной длительности оценивали ростовые (длина корней и побегов), а также цитогенетические параметры растений. В качестве контроля были необлучённые растения.

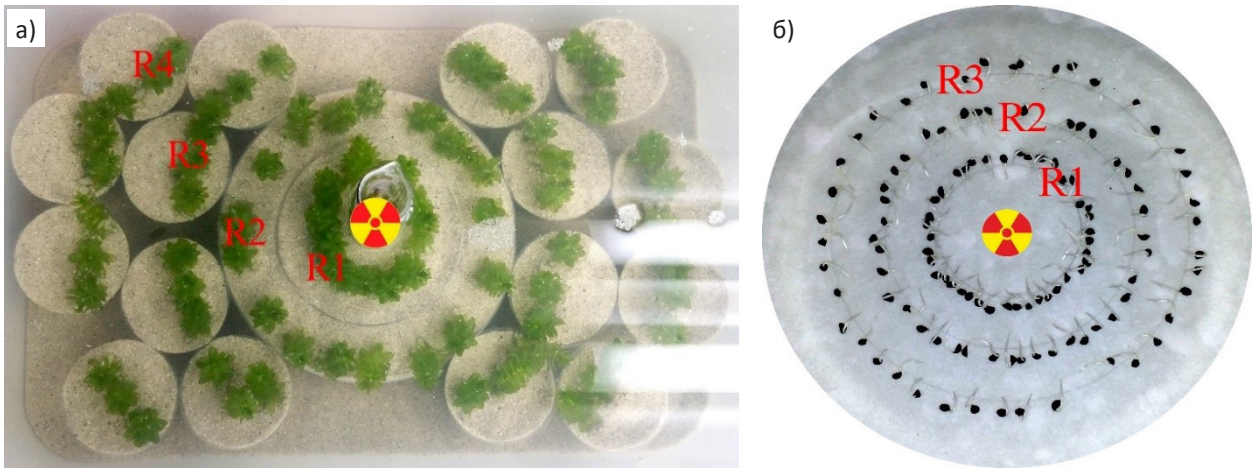


Рис. 1. Схема экспериментов по облучению побегов элодеи (А) и проростков семян лука (Б) источником ^{137}Cs. R1, R2, R3 и R4 – уровни облучения растений

Результаты и их обсуждение

Радиоэкологические исследования проведенные до остановки реактора ГХК (2004–2009 г) выявили широкий спектр техногенных радионуклидов в водных растениях реки Енисей как вблизи сбросов ГХК (с. Атаманово), так и на значительном расстоянии по течению реки от ГХК [2, 3]. Гамма-спектрометрические измерения показали, что в биомассе водных растений содержится до 30 радионуклидов, включая трансурановые элементы ^{239}Np и ^{241}Am (табл. 1). Концентрации таких радионуклидов как ^{24}Na, ^{51}Cr и ^{239}Np достигали нескольких тысяч Бк/кг, концентрации ^{46}Sc, ^{60}Co, ^{58}Co, ^{65}Zn, ^{76}As и ^{137}Cs достигали нескольких сотен Бк/кг, другие радионуклиды присутствовали в меньших количествах (табл. 1). На основании динамики общей β-активности проб было определено содержание ^{32}P, которое было максимальным для водного мха (*Fontinalis antipyretica*) – 58800 Бк/кг. Другие виды растений также показали высокую накопительную способность техногенных радионуклидов.

Погруженные водные растения накапливают радионуклиды как из воды, так и из донных отложений. В районе г. Красноярск и далее по течению реки до района сбросов ГХК содержание ^{137}Cs в донных отложениях регистрируется на уровне глобальных выпадений – около 16 Бк/кг, содержание ^{137}Cs в биомассе растений не превышает 2–5 Бк/кг. Начиная с района сбросов ГХК содержание ^{137}Cs в донных отложениях возрастает более чем в 100 раз (до 2000–4000 Бк/кг и в аномальных зонах до 10000 Бк/кг), а содержание ^{137}Cs в растениях возрастает в 50 раз (до 100–600 Бк/кг).

В апреле 2010 года последний реактор ГХК был остановлен и ожидалось, что техногенные радионуклиды более не будут поступать в р. Енисей. Однако спустя 2 года после остановки реактора в водных растениях регистрировали 11 техногенных радионуклидов, через 5 лет – 5 радионуклидов (^{60}Co, ^{106}Ru, ^{137}Cs, ^{152}Eu, and ^{241}Am). В этот период отсутствовали существенные отличия между видами растений в накоплении техногенных радионуклидов, поскольку радионуклиды поступали в растения в основном из донных отложений.

Ранее цитогенетические параметры водных растений широко использовались для биомониторинга радиационного загрязнения водоемов Чернобыльской зоны [8] и реки Енисей [6]. Исследования Института биофизики СО РАН позволили оценить уровень цитогенетических нарушений в клетках *E. canadensis* на разном расстоянии от ГХК по течению реки, а также в разные периоды времени [1, 3]. Как следует из данных рис. 2, максимальный уровень хромосомных нарушений клеток *E. canadensis* был отмечен вблизи сбросов ГХК в период до остановки реактора – 33 ± 4 %, для контрольного района вблизи Красноярска частота нарушений составила 3,0 ± 0,5 %. С увеличением расстояния от ГХК по течению реки частота аберраций вблизи села Балчуг несколько снижается (25 ± 3 %), но для удаленных районов на расстоянии 276–330 км от Красноярска (вблизи сел Захаровка и Стрелка) частота аберраций возрастает до 34 %, соответствующего уровню вблизи сбросов ГХК (рис. 2). В 2012 году (через 2 года после остановки реактора) уровень цитогенетических нарушений в корнях растений *E. canadensis* вблизи сбросов ГХК уменьшился в 2 раза с 33 до 15 % и далее по течению реки уровень цитогенетических нарушений в корнях *E. canadensis* уменьшался незначительно – до 10 и 13 % для районов на расстоянии 98 и 276 км от Красноярска, соответственно (рис. 2). Через 5 лет после остановки реактора уровень цитогенетических нарушений клеток растений в районах реки после сбросов ГХК уменьшился до 8–9 %, но оставался более высоким в сравнении с пробами контрольных районов (3,5 %). Для района вблизи села Стрелка (на расстоянии 330 км от Красноярска) после остановки реактора в 2012 году был получен неожиданный результат – уровень цитогенетических нарушений *E. canadensis* в одних местах отбора логически уменьшился до 7 %, а в других почти не изменился и составил 30 % (рис. 2). Более высокий уровень цитогенетических нарушений *E. canadensis* был отмечен для растений, отобранных в аномальных местах вблизи с. Стрелка, где содержание ^{137}Cs в донных отложениях достигало 8000 Бк/кг. В 2016–2019 годах максимальный уровень цитогенетических нарушений клеток растений в районах реки после сбросов ГХК уменьшился до 6–7,5 % (рис. 2), но оставался более высоким в сравнении с пробами контрольных районов (2 %).

Проведенные расчеты доз облучения гидробионтов показали, что до остановки последнего реактора ГХК дозы облучения некоторых видов водных растений достигали 0,25 мГр/сут. [3] и были вблизи порогового уровня доз облучения 0,24 мГр/сут. [7]. Однако для *Elodea canadensis* дозы облучения вблизи сбросов ГХК до остановки реактора составляли не более 0,072 мГр/сутки [3, 6], что ниже порогового уровня доз облучения. В районах поймы реки с аномальным содержанием ^{137}Cs в донных отложениях (с. Стрелка) и повышенным уровнем цитогенетических нарушений клеток растений дозы облучения *E. canadensis* достигали 0,045 мГр/сут. [3], что сопоставимо с дозой облучения растений до остановки реактора. Таким образом, относительно высокий уровень цитогенетических нарушений в клетках *E. canadensis* при повышенных дозах облучения растений, произрастающих вблизи сбросов ГХК (с. Атаманово) и на ^{137}Cs аномальных местах вблизи с. Стрелка позволяет считать определяющим действие радиационного фактора. Можно предположить, что частота хромосомных аберраций у элодеи определяется не только радиационным, но и химическим фактором, в частности, тяжелыми металлами и другими токси-

Таблица 1. Максимальные концентрации радионуклидов в водных растениях (Бк/кг), отобранных в реке Енисей вблизи сбросов ГХК (с. Атаманово) до остановки реактора в 2004–2009 годы

Радионуклид	*Fontinalis antipyretica*, Бк/кг	*Potamogeton lucens*, Бк/кг	*Ceratophyllum demersum*, Бк/кг	*Batrachium kauffmanii*, Бк/кг	*Myriophyllum spicatum*, Бк/кг	*Elodea canadensis*, Бк/кг
^{7}Be	500 ± 50	120 ± 8	100 ± 10	49 ± 5	213 ± 10	65 ± 7
^{24}Na	1850 ± 310	1270 ± 240	1180 ± 200	190 ± 40	560 ± 30	< MDA
^{40}K	450 ± 35	980 ± 50	750 ± 70	1000 ± 80	560 ± 35	1530 ± 80
^{46}Sc	310 ± 20	90 ± 5	90 ± 5	25 ± 1	59 ± 1	39 ± 1
^{51}Cr	4260 ± 70	3900 ± 320	2300 ± 150	1710 ± 8	400 ± 20	900 ± 56
^{54}Mn	80 ± 7	45 ± 5	40 ± 3	16 ± 1	30 ± 1	54 ± 3
^{58}Co	120 ± 4	160 ± 15	80 ± 5	49 ± 2	20 ± 1	50 ± 3
^{59}Fe	78 ± 12	40 ± 5	31 ± 3	15 ± 1	26 ± 1	6,7 ± 1,3
^{60}Co	800 ± 30	590 ± 25	610 ± 20	180 ± 4	310 ± 6	250 ± 10
^{65}Zn	330 ± 20	540 ± 35	750 ± 45	241 ± 6	210 ± 6	230 ± 6
^{76}As	330 ± 70	400 ± 100	100 ± 35	248 ± 11	110 ± 20	< MDA
^{85}Sr	3,4 ± 0,9	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA
^{95}Nb	50 ± 3	30 ± 1	8 ± 2	4,0 ± 0,5	7,2 ± 0,5	< MDA
^{95}Zr	42 ± 3	13 ± 1	8 ± 1	4 ± 2	9 ± 5	< MDA
^{99}Mo	6 ± 1	7 ± 3	< MDA	7 ± 3	4 ± 2	< MDA
^{103}Ru	21 ± 4	10 ± 2	12 ± 2	1,4 ± 0,4	4,3 ± 0,5	0,6 ± 0,3
^{106}Ru	63 ± 15	33 ± 2	60 ± 20	14 ± 4	< MDA	< MDA
^{131}I	35 ± 7	21 ± 5	21 ± 2	4,6 ± 0,9	8 ± 1	< MDA
^{134}Cs	6,9 ± 1,2	< MDA	< MDA	1,6 ± 0,3	< MDA	< MDA
^{137}Cs	660 ± 55	100 ± 10	24 ± 2	33,4 ± 1,3	44 ± 2	80 ± 6
^{140}Ba	85 ± 13	< MDA	20 ± 3	< MDA	18 ± 2	< MDA
^{140}La	105 ± 8	17 ± 1	23 ± 2	17 ± 1	15 ± 1	< MDA
^{141}Ce	85 ± 7	50 ± 5	49 ± 5	13 ± 1	17 ± 1	2,5 ± 0,9
^{144}Ce	80 ± 10	50 ± 5	45 ± 8	12 ± 2	15 ± 2	< MDA
^{152}Eu	70 ± 3	23 ± 1	14 ± 1	7,9 ± 0,3	30 ± 1	20 ± 2
^{154}Eu	20 ± 2	8 ± 0,4	5 ± 0,5	1,6 ± 0,2	5,3 ± 0,4	< MDA
^{239}Np	1490 ± 50	800 ± 22	1040 ± 45	174 ± 21	490 ± 17	110 ± 55
^{241}Am	5,4 ± 1,9	2,1 ± 0,9	< MDA	1,1 ± 0,4	< MDA	8,4 ± 2,3
^{32}P	58800 ± 1700	39800 ± 1500	–	32300 ± 1100	31300 ± 600	15100 ± 2700

MDA – Минимальная детектируемая активность.

кантами. Также можно ожидать мутагенного эффекта кумулятивного действия химических токсикантов и радионуклидов.

Ранее отмечали, что что в пойменных почвах и донных отложениях реки Енисей найдены радиоактивные частицы с высокой активностью ^{137}Cs, которые могут быть точечными источниками внешнего облучения гидробионтов. Присутствие радиоактивных частиц с разной активностью ^{137}Cs может увеличить дозы облучения корней элодеи в пойме реки Енисей, однако точные оценки затруднены из-за неоднородного характера распределения частиц [4, 5]. Для оценки чувствительности растений к малым дозам внешнего γ-излучения за счет радиоактивных ^{137}Cs частиц проводили лабораторные эксперименты по вышеотмеченной схеме (рис. 1). Лабораторные эксперименты с элодеей и внешним точечным источником γ-излучения показали противоречивые данные для ростовых параметров. Так, средние длины побегов, выросших при разных дозах, достоверно не отличались между собой, а длина корней в отдельных экспериментах демонстрировала угнетение роста при высоких дозах облучения. При этом была получена достоверная положительная зависимость общего числа хромосомных нарушений клеток элодеи от поглощенной дозы в двух экспериментах

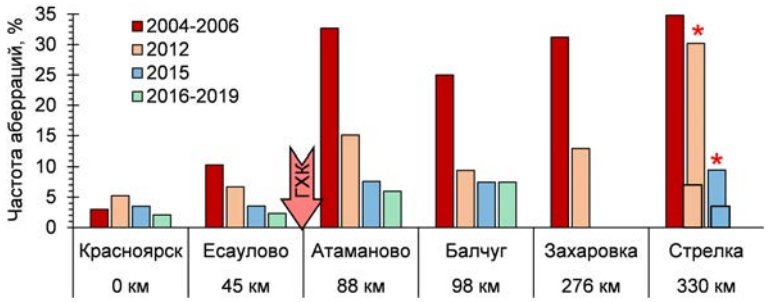


Рис. 2. Распределение цитогенетических нарушений (%) в корнях *Elodea canadensis*, отобранных по течению р. Енисей до остановки реактора ГХК (2004–2006) и после остановки (2012, 2015, 2016–2019)

* – Частота цитогенетических нарушений для аномального по ^{137}Cs участка вблизи с. Стрелка в 2012 и 2015. Расстояние от Красноярска в км

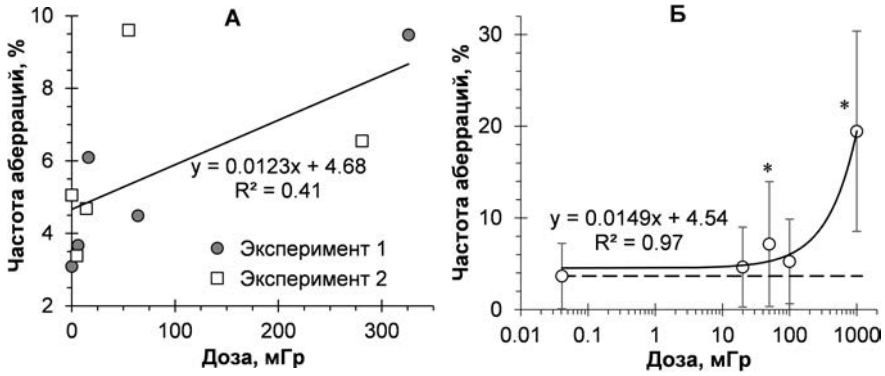


Рис. 3. Зависимость частоты хромосомных аберраций (%) в клетках корней *Elodea canadensis* (А) и проростков *Allium* сера (Б) от поглощённой дозы в лабораторных экспериментах

(рис. 3 А). В проведенных нами экспериментах максимальный цитогенетический эффект облучения элодеи (частота хромосомных нарушений до 9,5 %) регистрировали для уровней облучения R2 и R1 – 5,0 и 25,4 мГр/сутки, т. е. выше пороговой дозы (0,24 мГр/сутки). При этом поглощенные дозы растениями были на уровне малых доз облучения в интервале от 55 до 330 мГр. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о радиочувствительности уровня хромосомных нарушений для элодеи, что согласуется с цитогенетическими данными для элодеи, отобранной в районах реки Енисей с разным уровнем радиоактивного загрязнения (рис. 2).

Для дополнительной сравнительной оценки чувствительности к повышенному уровню внешнего гамма-излучения, наряду с водным растением элодея, в экспериментах использовали луковый биотест (*Allium-test*). Эксперимент проводили по стандартной схеме (как и для элодеи) с использованием радиоактивных точечных источников ^{137}Cs (рис. 1). В проведенных экспериментах по облучению проростков семян лука регистрировали достоверное увеличение частоты хромосомных нарушений клеток лука (рис. 3 Б), но при этом отсутствовало угнетение роста корней. Эксперименты с использованием лукового биотеста подтвердили полученные выше данные для элодеи о радиационной чувствительности уровня хромосомных нарушений в области малых доз облучения.

Заключение

Многолетняя деятельность Горно-химического комбината (ГХК) Росатома привела к радиоактивному загрязнению экосистемы реки Енисей. Водные растения как важный компонент экосистемы реки накапливают высокие активности техногенных радионуклидов и могут быть использованы в биоиндикации и биотестировании. Результаты биомониторинга показали, что частота хромосомных нарушений клеток водного растения *Elodea canadensis*, отобранного вблизи сбросов ГХК, была значительно выше частоты нарушений для растений из фоновых районов. Лабораторные эксперименты с использованием растительных биотестов (*Elodea canadensis* и *Allium*-тест) выявили увеличение частоты хромосомных нарушений при гамма-облучении растений малыми дозами за счет радиоактивных частиц. Полученные данные свидетельствуют о потенциальном влиянии малых доз ионизирующего излучения на биоту реки Енисей в районах по течению от ГХК.

Литература

1. Медведева М. Ю. Спектр хромосомных аберраций в корневой меристеме *E. canadensis* из районов р. Енисей с разными типами техногенного загрязнения / Медведева М. Ю., Болсуновский А. Я. // Экологическая генетика, 2016. – Т. XIV. – № 2. – С. 57–66.
2. Сухоруков Ф. В. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей / Сухоруков Ф. В., Дегерменджи А. Г., Белолипецкий В. М., Болсуновский А. Я., Косолапова Л. Г. и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004. – 286 с.
3. Bolsunovsky A. Biomonitoring of radioactive contamination of the Yenisei River using aquatic plants / Bolsunovsky A., Dementyev D., Trofimova E. // Journal of Environmental Radioactivity, 2020. – Vol. 211. – Art. № 106100.
4. Bolsunovsky A. Unique diversity of radioactive particles found in the Yenisei River floodplain / Bolsunovsky A., Melgunov M., Chuguevskii A., Lind O. C., Salbu B. // Scientific Reports, 2017. – 7. – Article number: 11132. – P. 1–10.
5. Bolsunovsky A. Radioactive particles in the Yenisei River floodplain (Russia): characterization, leaching and potential effects in the environment / Bolsunovsky A., Melgunov M. // J. Environ. Radioact, 2019. – V. 208–209. – № 105991. (1–8).
6. Bolsunovsky A. The effect of radionuclide and heavy metal contamination of the Yenisei River on cytogenetics of aquatic plant Elodea canadensis / Bolsunovsky A., Muratova E., Sukovaty A. and Kornilova M. // Radioprotection, 2009. – 44 (5). – P. 83–88.
7. Garnier-Laplace J. Fukushima wildlife dose reconstruction signals ecological consequences / Garnier-Laplace J., Beaugelin-Seiller K., Hinton T. G. // Environ. Sci. Technol, 2011. – 45. – P. 5077–5078.
8. Gudkov D. I. Radiation-induced cytogenetic and hematologic effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone / Shevtsova N. L., Pomortseva N. A., Dzyubenko E. V., Kaglyan A. E., Nazarov A. B. // J. Environ. Radioact, 2016. – 151. – P. 438–448.
9. Vaijapurkar S. G. Gamma-irradiated onions as a biological indicator of radiation dose / Vaijapurkar S. G., Agarwal D., Chaudhuri S. K., Senwar K. R., Bhatnagar P. K. // Radiation Measurements, 2001. – 133 (5). – 833–836.

РАНЖИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИЙ ПО СТАБИЛЬНОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОВРЕМЕННОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

Ю. Ю. Брайт[1], А. В. Липихина[2], Н. В. Барановская[3]

[1]Томский политехнический университет
Томск, Россия, d.yuliay@mail.ru
[2]Научно-исследовательский институт радиационной медицины и экологии
Медицинский университет Семей
Семей, Казахстан, a.v.lipikhina@mail.ru
[3]Томский политехнический университет
Томск, Россия, natalya.baranovs@mail.ru

RANKING OF TERRITORIES BY STABILITY OF RADIATION INDICATORS OF MODERN ENVIRONMENTAL SITUATION

Y. Y. Brait[1], A. V. Lipikhina[2], N. V.Baranovskaya[3]

[1]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, d.yuliay@mail.ru
[2]Scientific Research Institute of Radiation Medicine and Ecology
State Medical University Semey
Semey, Kazakhstan, a.v.lipikhina@mail.ru
[3]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, natalya.baranovs@mail.ru

As part of the execution of works on the topic "Development of scientific and methodological foundations for minimizing the environmental load, medical support, social protection of ecologically unfavorable territories of the Republic of Kazakhstan" the study areas were ranked according to the stability of radiation indicators (the power of the exposure dose of gamma radiation, the concentration of radon, the density of the flow of alpha and beta particles) of the ecological situation, radon, flux density of alpha and beta particles) of the ecological situation. The Borodulikha village is the most stable settlement in terms of the radioecological situation of all the studied ones. The stability index for the village is 75 %. All other localities (Ust-Kamenogorsk and Aksu cities, Akzhar, Karaul, and Kurchum villages) belong to the territories with average stability of the radioecological situation.

Введение

Для формирования целостной картины радиоэкологической обстановки исследуемых территорий проведена оценка стабильности радиационных показателей современной экологической обстановки, в число которых вошли: мощность экспозиционной дозы гамма-излучения на местности, концентрация радона в воздухе жилых домов и в зданиях социально-общественного назначения, плотности потока альфа- и бета-частиц от поверхности почвы.

Основываясь на методах математического анализа [1, 2], введен критерий стабильности радиоэкологических показателей, получаемый из соотношения инверсии разброса значений радиационного показателя по населенному пункту к максимальному значению данного показателя по всем исследуемым территориям.

Стабильность радиоэкологических показателей демонстрирует вероятность того, что при более детальном исследовании местности будут получены схожие показатели без значительных отклонений от значений, приведенных в этом исследовании, а также вероятность выравнивания радиоэкологических показателей местности относительно имеющихся средних значений в дальнейшей перспективе. Показатели населенных пунктов с низким значением стабильности могут значительно колебаться относительно средних значений и выходить за границы определенных на местности предельных значений, а следовательно должны быть подвергнуты дополнительному исследованию на предмет уточнения радиоэкологической обстановки местности.

Материалы и методы

Ранжирование территорий по стабильности радиационных показателей современной экологической обстановки проведено на основании результатов измерений, выполненных на исследуемых территориях в 2017–2018 гг.

Исследуемые населенные пункты:

- г. Усть-Каменогорск ВКО,
- г. Аксу Павлодарской области,
- с. Акжар Майского района Павлодарской области,
- с. Бородулиха Бородулихинского района ВКО,
- с. Караул Абайского района ВКО,
- с. Курчум Курчумского района ВКО.

При выполнении работы были проведены следующие радиоэкологические измерения:

- мощность экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения;
- экспозиционная равновесная объемная активность (ЭРОА) радона в жилых помещениях;
- плотность потока альфа- и бета-частиц от поверхности почвы.

Общий объем проведенных измерений представлен в таблице 1.

Оценка радиационных показателей современной экологической обстановки исследуемых территорий проводилась с использованием инструментальной базы передвижной радиоэкологической лаборатории: радиометр-дозиметр «РКС-01-СОЛО», гамма-бета спектрометр «СПЕКТР-01-СОЛО», установка дозиметрическая «ГАММА-СЕНСОР», радиометр-дозиметр «РКС-01-ГИ-СОЛО», радиометр радона и его дочерних продуктов распада «РАМОН-02» с «РАМОН-РАДОН-01», дозиметр-радиометр «МКС-01СА1М».

Универсальные радиометры-дозиметры «РКС-01-СОЛО», «РКС -01-ГИ-СОЛО», «МКС-01СА1М», которые включают в себя блок детектирования альфа, бета-частиц и блок детектирования гамма-излучения, использовались для определения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения и для определения плотности потока альфа- и бета-частиц.

Используемое оборудование при измерении ЭРОА радона – радиометр радона и его дочерних продуктов распада «РАМОН-02» совмещённый с «РАМОН-РАДОН-01» в едином корпусе.

Все замеры проводились в соответствии с установленными сертифицированными методиками для используемого оборудования.

Результаты и обсуждения

Все значения радиационных параметров, полученные в ходе полевых измерений на местности в исследуемых населенных пунктах в период 2017–

Таблица 1. Объем проведенных измерений для оценки радиационных показателей современной экологической обстановки

Радиоэкологический параметр	Населенный пункт						Всего измерений
	г. Усть-Каменогорск	г. Аксу	с. Акжар	с. Бородулиха	с. Караул	с. Курчум	
Мощность экспозиционной дозы	100	0	0	0	0	0	400
Концентрация радона	50	0	5	5	5	5	200
Суммарная альфа-активность	50	0	5	5	5	5	200
Суммарная бета-активность	50	0	5	5	5	5	200
Всего	**250**	**50**	**25**	**25**	**25**	**25**	**1000**

Таблица 2. Результаты измерений радиационных параметров исследованных населенных пунктов

Населенный пункт	МЭД гамма-излучения, мкЗв/ч	ЭРОА радона, Бк/м^3	Плотность потока альфа-частиц, частиц/мин • см^2	Плотность потока бета-частиц, частиц/мин • см^2
г. Усть-Каменогорск	0,13 (0,05–0,21)	14 (3–64)	2,80 (1–6,00)	17,70 (12,00–26,00)
г. Аксу	0,13 (0,07–0,24)	15 (2–68)	2,52 (1–5,00)	14,04 (8,00–22,00)
с. Акжар	0,07 (0,05–0,12)	34 (1–139)	3,04 (1–7,00)	13,72 (8,00–21,00)
с. Бородулиха	0,05 (0,02–0,08)	22 (2–68)	0,22 (0–0,98)	1,50 (0,07–3,51)
с. Караул	0,06 (0,04–0,09)	20 (1–84)	1,41 (0–5,00)	11,90 (0,21–28,83)
с. Курчум	0,07 (0,05–0,12)	14 (1–33)	0,35 (0–3,00)	4,98 (0,00–23,50)

Таблица 3. Стабильность радиоэкологических показателей исследованных территорий

Населенный пункт	Стабильность радиоэкологических показателей региона, %			
	МЭД	ЭРОА радона	плотность потока α-частиц	плотность потока β-частиц
г. Усть-Каменогорск	33,33	56,12	28,57	51,43
с. Акжар	70,83	0,72	14,29	54,9
г. Аксу	29,17	52,52	42,86	51,43
с. Бородулиха	75,00	52,52	85,94	88,09
с. Караул	79,17	40,29	28,57	0,74
с. Курчум	70,83	76,98	57,14	18,48

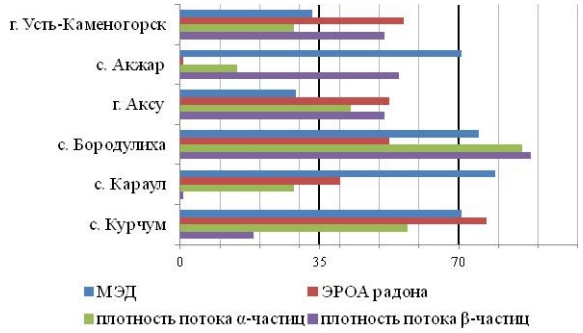


Рис. 1. Стабильность радиоэкологических показателей исследуемых населенных пунктов

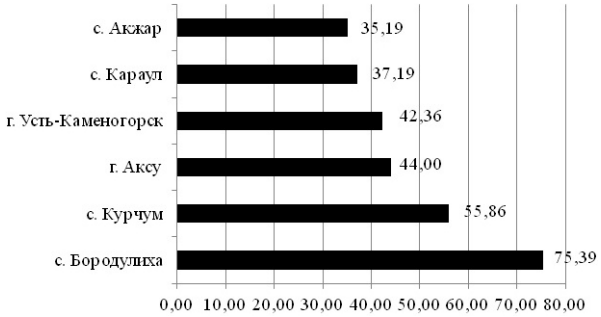


Рис. 2. Ранжирование исследуемых территорий по стабильности радиационных показателей современной экологической обстановки

2018 гг., сведены к средним значениям и приведены в таблице 2. В таблице также приведен разброс значений каждого параметра (указано в скобках).

Полученные значения стабильности радиационных показателей по населенным пунктам для исследованных радиационных показателей приведены в таблице 2.

Для оценки стабильности радиоэкологической обстановки территорий введены три группы уровня стабильности:

1. Низкая стабильность (до 35 %).
2. Средняя стабильность (35–70 %).
3. Высокая стабильность (выше 70 %).

По показателям мощности экспозиционной дозы гамма-излучения в группу с высокой стабильностью попали села Караул, Бородулиха, Акжар и Курчум. В группу с низкой стабильностью попали города Усть-Каменогорск и Аксу. Данный факт объясняется тем, что территория городов значительно больше территории сел, что дает больший разброс значений на местности.

Ввиду высокой подвижности радона, стабильность показателей его активности, как правило, невелика. Большинство исследуемых населенных пунктов находятся в группе средней стабильности. Исключением являются село Курчум с высоким показателем стабильности (77 %) и село Акжар с очень низкой стабильностью (0,7 %). Подобные перепады объясняются географическим расположением населенных пунктов.

Показатель стабильности плотности потока альфа-частиц от поверхности земли по населенным пунктам имеет преимущественно низкие показатели. Так, в группу низкой стабильности вошли села Акжар, Караул и город Усть-Каменогорск. В группу средней стабильности попали город Аксу и село Курчум. К группе высокой стабильности по данному радиоэкологическому показателю относится село Бородулиха со значением 86 %.

В группу средней стабильности для плотности потока бета-частиц от поверхности земли вошли города Усть-Каменогорск, Аксу и село Акжар. К группе с высокой стабильностью относится село Бородулиха со значением 88 %. В группу с низкой стабильностью показателя вошли села Курчум и Караул.

Стабильность радиоэкологических показателей для исследованных населенных пунктов показана на рисунке 1.

Проведенный анализ позволяет определить общую стабильность радиоэкологической обстановки для каждого из исследованных населенных пунктов. Полученные усредненные значения приведены на рисунке 2.

Заключение

Для формирования целостной картины радиоэкологической обстановки исследуемых территорий проведена оценка стабильности радиационных показателей современной экологической обстановки.

Село Бородулиха является наиболее стабильным в плане радиоэкологической обстановки населенным пунктом из всех исследуемых. Показатель стабильности для села равен 75 %.

Все остальные населенные пункты относятся к территориям со средней стабильность радиоэкологической обстановки. Наименьшая радиоэкологическая стабильность среди изучаемых населенных пунктов наблюдается на территории села Акжар со значением 35 %.

Стабильность радиоэкологических показателей демонстрирует вероятность того, что при более детальном исследовании местности будут получены схожие показатели без значительных отклонений от значений, приведенных в этом исследовании, а также вероятность выравнивания радиоэкологических показателей местности относительно имеющихся средних значений в дальнейшей перспективе.

Литература

1. Айвазян С. А., Мхитарян В. С. Теория вероятностей и прикладная статистика: Учебник – М.: ЮНИТА-ДАНА, 2001. – 655 с.
2. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УРАНА И ТОРИЯ НА ТЕРРИТОРИИ г. ЮРГА ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ СНЕГОВОГО ПОКРОВА

Ю. С. Будаева[1], А. В. Таловская[1], Е. Г. Язиков[1], Е. С. Торосян[2]

[1]Томский политехнический университет
Томск, Россия, Julia.Empler@yandex.ru
[2]Юргинский технологический институт Томского политехнического университета
Юрга, Россия

ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF URANIUM AND THORIUM IN THE TERRITORY OF YURGA ACCORDING TO THE DATA OF STUDYING THE SNOW COVER

Y. S. Budaeva[1], A. V. Talovskaya[1], E. G. Yazikov[1], E. S. Torosyan[2]

[1]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, Julia.Empler@yandex.ru
[2]Yurga Technological Institute
Tomsk Polytechnic University, Russia

In work are presented schematic maps of the spatial distribution of the contents of uranium and thorium from the atmosphere on the snow cover of the territory of Yurga with characteristics of possible sources. The highest total load and the coefficients of the relative increase in the total load of radioactive elements are in the industrial zone and the private sector, from where the contamination goes to other functional areas.

Введение

Радиоактивные элементы – уран и торий входят в состав минеральной части углей в качестве примесей [1, 3]. Обогащенная этими элементами зола в районах расположения угольных теплоэлектростанций формирует радиационное загрязнение окружающей среды [3]. Химическая токсичность аэрозолей урана и способность тория накапливаться в легких, увеличивая риски возникновения рака, вызывает необходимость изучения распространения этих элементов от источников в районы жилой зоны городов [6, 13].

Поступление радионуклидов в природную среду рассматривается в связи с угольными ТЭЦ, поскольку в районах их расположения в снеге формируются контрастные ореолы с повышенными содержаниями урана и тория [2], которые высвобождаются при сжигании органической части угля вместе с золой уноса [7].

Город Юрга располагается в северо-западной части Кузбасса. Основными отраслями производства в

городе являются металлообрабатывающие заводы, сосредоточенные в промышленной зоне. Поступление радиоактивных элементов может быть связано с ТЭЦ машзавода, обеспечивающая 98 % города центральным теплоснабжением, где в качестве основного теплоресурса используют Кузнецкий уголь, который в виде примесей содержит различными микроэлементы, включает радиоактивные элементы [1, 10], а также в меньшей степени – жилой сектор, в котором для отопления применяют домовые печи.

Целью данной работы является изучение характера распространения и источников поступления радиоактивных элементов (уран и торий) в твердом осадке снега на территории г. Юрга.

Материалы и методы

Снегогеохимическая съемка на территории г. Юрга проводилась в феврале 2016 г. с шагом 500–1000 м. Для отбора использовали метод создания шурфа на всю толщину снегового покрова за исключением 5-ти см над почвенным покровом. Подготовка проб включала таяние снега, фильтрацию снеготалой воды для получения твердого осадка и взвешивание просушенного фильтра в соответствии с методическими рекомендациями ИМГРЭ [4]. Всего было отобрано и подготовлено к анализу 46 проб.

Анализ твердого осадка снега на содержание 28 элементов, включая уран и торий, проводили инструментальным нейтронно-активационным методом на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т НИ ТПУ (аналитики Судыко А. Ф., Богутская Л. В.).

Обработка результатов проводилась на основе эколого-геохимических показателей [4]:

1) Коэффициент концентрации ($К_с$): $К_с = С/С_ф$, где С – содержание химического элемента, мг/кг; $С_ф$ – фоновое содержание химического элемента, мг/кг.

2) Общая нагрузка элемента на снеговой покров ($Р_{общ}$): $Р_{общ} = С \bullet Р_п$, где $Р_п$ – пылевая нагрузка на снеговой покров, кг/(км^2 • х • сут.).

3) Коэффициент относительного увеличения общей нагрузки элемента: $К_р = Р_{общ}/Р_ф$, где $Р_ф$ – фоновая нагрузка исследуемого элемента, мг/(км^2 • х • сут).

Фоновые значения брались в соответствии с опубликованными работами и ранее проведенными нами исследованиями [11–12].

Расчеты проводились в программе MS Excel, а статистический анализ данных в ПО «Statistica». Построение карт пространственного распределения элементов по геохимическим показателям в программе Surfer методом Kriging от минимальных величин для содержаний по выборке.

Результаты и их обсуждение

Проведенные ранее нами исследования пылевой нагрузки на снеговой покров города Юрга позволили выявить высокий уровень загрязнения в промышленной зоне, где расположены крупнейшие предприятия города, а также средний уровень загрязнения в жилом секторе [5]. По результатам вещественного анализа было установлено, что высокий уровень пылевой нагрузки формируется за счет

Таблица 1. Элементы описательной статистики содержания урана и тория в пробах твердого осадка снега на территории г. Юрга, мг/кг

Элемент	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации
U	8,3	8,0	5,8	11,4	1,4	16,8
Th	16,0	16,1	11,7	26,9	2,6	16,1

Таблица 3. Величина общей нагрузки ($Р_{общ}$) и коэффициента относительного увеличения общей нагрузки ($К_р$) радиоактивных элементов территории г. Юрга по данным изучения твердого осадка снега

Территория	$Р_{общ}$, г/(кг^2 • х • сут.)		$К_р$	
	U	Th	U	Th
г. Юрга (среднее)	1,4	2,6	995	129
Промышленная зона	2,5	4,6	1445	177
Рекреационная зона	0,7	1,1	467	55,7
Жилая зона:				
– одноэтажная	0,9	1,7	613	85,9
– малоэтажная	0,9	2,1	711	105
– среднеэтажная	0,6	1,2	431	57,9
– высокоэтажная	0,7	1,4	499	69,3

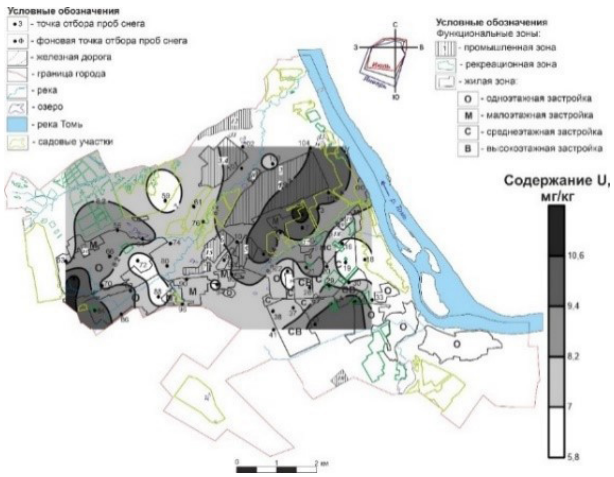


Рис. 1. Карта-схема пространственного распределения содержания урана в твердом осадке на территории г. Юрга, мг/кг

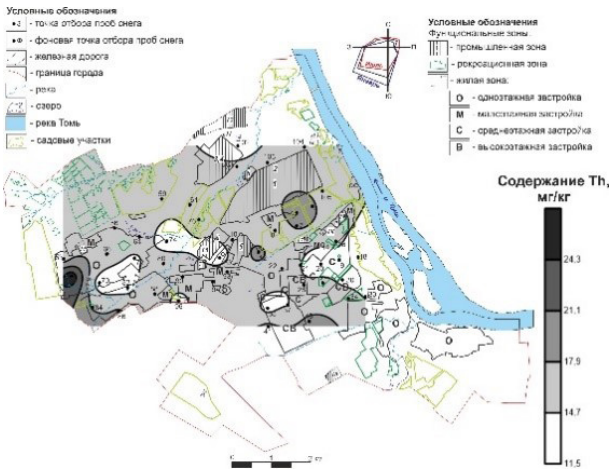


Рис. 2. Карта-схема пространственного распределения содержания тория в твердом осадке снега на территории г. Юрга, мг/кг

Основные промышленные предприятия и объекты (1–9): 1 – Машзавод, 2 – ТЭЦ, 3 – Ферросплавный завод, 4 – Абразивный завод (закрылся в 2012 г.), 5 – Завод ЮрМашТрио, 6 – Завод по производству строительных материалов, 7 – Молочный завод, 8 – шлакоотвал машзавода, 9 – Энерготранс, 10, 11 – полигон ТБО, 12 – отстойник, 13 – Юргагидравлика, 14 – Городское транспортное предприятие, 15 – Производство упаковочных изделий, ООО, 16 – Производство оборудования для добычи полезных ископаемых и строительства, 17 – Энергосеть, 18 – Хлебзавод, 19 – Мебельная компания.

техногенных частиц разного типа: в большей степени за счет частиц угля, угольной пыли и шлаков, а также алюмосиликатных микросферул [8].

Нами на территории г. Юрга установлен высокий уровень загрязнения снегового покрова 28 химическими элементами. Наибольший вклад в формирование такого уровня загрязнения вносят редкие и редкоземельные элементы, Zn, Ba, Co, Ta, Th, U. Вклад урана в суммарный показатель загрязнения наибольший среди остальных элементов и в среднем составляет 23 %, вклад тория – 3 %.

На территории города для урана и тория характерно однородное распределение в пробах твердого осадка снега, что означает наличие единого источника поступления элементов в окружающую среду (таблица 1–2).

Уран. Содержание урана в твердом осадке снега варьирует от 5,8 до 11,4 мг/кг. Ореолы наиболее высоких содержаний элемента характерны для района расположения ТЭЦ машзавода, окрестностей промышленной зоны с прилегающими садово-дачными участками, частного сектора в западной и юго-восточной частях города (рисунок 1).

Превышение содержания урана над фоном установлено от 29 до 57 раз, наибольшие превышения характерны для промышленного узла и рекреационной зоны в окрестностях частного сектора города (таблица 2), что связано со сжиганием на ТЭЦ и в домовых печах в частном секторе города кузнецких углей, в которых установлены содержания урана, превышающие средние величины содержания радионуклидов в углях [1, 10]. Кроме того, нами в золе из домовой печи частного сектора г. Юрга, жители которого используют кузнецкий уголь для отопления, установлено высокое содержание этого элемента (14,8 мг/кг). Ореолы высоких содержаний наблюдаются также в прилегающей рекреационной зоне и в районах жилой застройки другой этажности.

Высокая пылевая нагрузка в промышленной зоне обуславливает более высокую общую нагрузку урана в промышленной зоне и более низкую по сравнению со среднегородской в рекреационной и жилой зонах, причем в районе одно- и малоэтажной застройки Робщ несколько выше, чем в зоне рекреации. Коэффициент относительного увеличения общей нагрузки урана наиболее высокий для промышленной зоны и наиболее низкий для рекреационной и жилой средне- и малоэтажной зон (таблица 3).

Торий. Содержание элемента в твердом осадке снега на территории г. Юрга изменяется от 11,7 до 26,9 мг/кг. Ореолы наиболее высоких содержаний тория характерны для тех же районов, что и для урана: окрестности промышленной зоны и частный сектор (рисунок 2).

В золе из домашней печи в частном секторе содержание элемента составляет 28,4 мг/кг. Коэффициенты концентрации для тория варьируют от 4 до 9 раз. Распространение элемента несколько схоже с распространением урана: наибольшие превышения отмечаются в промышленной зоне, жилой одно- и малоэтажной застройке (таблица 2), что говорит о едином источнике поступления этих элементов. Торий также, как и уран, широко распространен в кузнецких углях, он концентрируется главным образом в собственных минеральных формах – фосфатах редкоземельных элементов, поступающих в воздух вместе с золой уноса при сжигании угля [1, 10].

Таблица 2. Величина содержания (С), торий-уранового отношения (Th/U) и коэффициента концентрации ($К_с$) радиоактивных элементов в твердом осадке снега территории г. Юрга

Территория	Содержание, мг/кг		Th/U, ед.	$К_с$	
	U	Th		U	Th
г. Юрга (среднее)	8,3 / 5,8 – 11,4 46	16 / 11,7 – 26,9 46	1,9	41,5 / 29,2 – 56,7 46	5,5 / 4,04 – 9,3 46
Промышленная зона	8,7 / 6,1 – 11,4 16	16,3 / 12,5 – 19,9 16	1,8	43,8 / 30,6 – 56,7 16	5,6 / 4,3 – 6,9 16
Рекреационная зона	9,1 / 6,9 – 10,8 4	15,5 / 11,7 – 17,7 4	1,7	45,4 / 34,9 – 53,8 4	5,3 / 4,0 – 6,1 4
Жилая зона:					
– одноэтажная	8,1 / 5,8 – 11,2 13	16,4 / 12,6 – 26,9 13	2,0	40,3 / 29,2 – 55,8 13	5,6 / 4,3 – 9,3 13
– малоэтажная	7,4 / 6,7 – 7,9 4	16,1 / 13,5 – 17,9 4	2,2	37,2 / 33,7 – 41,7 4	5,6 / 4,6 – 6,2 4
– среднеэтажная	7,8 / 5,8 – 10,1 10	15,1 / 11,9 – 18,9 10	1,9	38,8 / 29,2 – 50,4 10	5,2 / 4,1 – 6,5 10
– высокоэтажная	7,9 / 6,9 – 10,1 6	15,8 / 13,6 – 18,9 6	2,0	39,8 / 34,9 – 50,4 6	5,5 / 4,7 – 6,5 6

Примечание: в числителе – среднее, в знаменателе – минимальное и максимальное содержание, справа – количество проб.

Общая нагрузка тория наиболее высокая так же, как и для урана, наблюдается в промышленной зоне города. В рекреационной и жилой зонах она находится ниже уровня среднегородской и только на территории малоэтажной застройки – сопоставима с ней. Коэффициент относительного увеличения общей нагрузки тория наиболее высокий для промышленной зоны и наиболее низкий для рекреационной и жилой средне- и высокоэтажной зон (таблица 3).

По величине торий-уранового отношения в твердом осадке снега территории г. Юрга (в среднем равное 1,9) он относится к урбанизированным территориям под влиянием теплоэнергетического комплекса [7].

Заключение

В работе рассмотрен характер распределения содержаний урана и тория в твердом осадке снега на территории г. Юрга. Ореолы высоких содержаний приурочены к району расположения ТЭЦ, расположенного в промышленной зоне, и к частному сектору с печным отоплением. Уран и торий в составе золы уноса в атмосферном воздухе могут распространятся в остальные районы города – рекреационную и жилую зоны.

Литература

1. Арбузов С. И. Металлоносность углей Сибири // Известия Томского политехнического университета. – Томск, 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 77–83.
2. Артамонова С. Ю. Уран и торий в аэрозольных выпадениях г. Новосибирска и его окрестностей (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. – Томск, 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 212–223.
3. Кизильштейн Л. Я. Угольные примеси – ценные и коварные // Наука и жизнь. – М., 2014. – С. 70–75.
4. Методические рекомендации, по геохимической оценке, загрязнения территории городов химическими элементами. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 112 с.
5. Мониторинг пылевого загрязнения городских агломераций Западной Сибири по данным изучения снежного покрова / А. В. Таловская [и др.] // Современные проблемы географии и геологии к 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Томск, НИ ТГУ, 2017. – С. 540–544.
6. Петрина Л. С. Химическая и радиационная опасность аэрозолей урана // Атомная энергия, 2008. – Т. 5. – Вып. 1. – С. 48–53.
7. Радиоактивные элементы в атмосферных выпадениях снегового покрова урбанизированных

территориях / Е. Г. Язиков [и др.] // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. – Томск, 2016. – С. 747–751.
8. Техногенные частицы в твердом осадке снега как индикаторы загрязнения городской территории (г. Юрга, Кемеровская область) / Ю. С. Будаева, А. В. Таловская // Геоэкология: теория и практика: сборник научных трудов Всероссийской студенческой конференции с международным участием. – М: РУДН, 2020. – С. 72–80.
9. Технология металлов и материаловедение / Б. В. Кнорозов [и др.]. – М.: Металлургия, 1987. – 799 с.
10. Угли Кузбасса: химические элементы-примеси и технологии их извлечения при комплексном освоении месторождений / Б. Ф. Нифантов [и др.]. – Кемерово: ИУ СО РАН, 2011. – 310 с.
11. Шатилов А. Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: автореф. дис. … канд. геол.-мин. наук. – Томск, 2001. – 24 с.
12. Язиков Е. Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: автореф. дис. … д-р. геол.-мин. наук. – Томск, 2006. – 47 с.
13. Health effects following long-term exposure to thorium dusts: a twenty-year follow-up study in China / X. A. Chen et. al. // Radioprotection, 2004. – Vol. 39. – № 4. – P. 525–533.

РАДИОАКТИВНОСТЬ ГОРОДСКИХ И СЕЛЬСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Е. А. Бураева[1], Т. М. Минкина[2], А. В. Огиенко[3], Е. Ю. Антонова[3], И. С. Ревнивцев[3], К. А. Калашникова[3], О. В. Каменев[3], А. Е. Шадин[3], Т. А. Михайлова[1]

[1]Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета
Ростов-на-Дону, Россия, buraeva@sfedu.ru
[2]Академия биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского Южного федерального университета
Ростов-на-Дону, Россия, minkina@sfedu.ru
[3]Физический факультета Южного федерального университета
Ростов-на-Дону, Россия, ahk063@gmail.com

RADIOACTIVITY OF URBAN AND RURAL SETTLEMENTS OF THE ROSTOV REGION

E. A. Buraeva[1], T. M. Minkina[2], A. V. Ogienko[3], E. Yu. Antonova[3], I. S. Revnivtsev[3], K. A. Kalashnikova[3], O. V. Kamenev[3], A. E. Shadin[3], T. A. Mikhaylovaa[1]

[1]Research Institute of Physics, Southern Federal University
Rostov-on-Don, Russia, buraeva@sfedu.ru
[2]Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University
Rostov-on-Don, Russia, minkina@sfedu.ru
[3]Faculty of Physics, Southern Federal University
Rostov-on-Don, Russia, ahk063@gmail.com

Введение

Ионизирующее излучение от природных источников, таких как естественные радионуклиды земного происхождения и космическое излучение, вносит наибольший вклад в формирование эффективной дозы облучения, получаемой населением ежегодно [1–3]. Показано, что эффективная доза, обусловленная космическим излучением, зависит от высоты над уровнем моря и солнечной активности [1, 4]. Эффективная доза от земных радионуклидов определяется геологическим строением региона, таким как состав подстилающих пород, активность тектонических нарушений, развитие экзогенных геологических процессов и т. д. Эффективная доза от земных радионуклидов обусловлена излучением естественных радионуклидов (^{226}Ra, ^{232}Th и ^{40}K), которые содержатся в почвах и обнаженных породах территории [4, 5], излучением искусственного радионуклида ^{137}Cs [6], который за последние 70 лет стал частью естественного радиационного фона, а также эманацией радиоактивного газа ^{222}Rn с поверхности почвы [4, 7].

На урбанизированных территориях дополнительными источниками ионизирующих излучений могут являться выхлопы автотранспорта, выбросы предприятий, работающих на угле и газе, добыча полезных ископаемых, использование при строительстве природных материалов с повышенным содержанием радионуклидов и др.

В Российской Федерации одним из критериев радиационной обстановки на различных территориях является мощность эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч). В регионах мониторинговые исследования радиационного фона проводят различные надзорные службы. При этом, пункты наблюдений, как правило, либо стационарны (например, в зонах наблюдения АЭС), либо не известны.

Работа посвящена оценке гамма-фона (МЭД) в различных населенных пунктах Ростовской области. Подобные исследования актуальны для обеспечения радиационной безопасности населения и расчетах доз облучения от природных источников ионизирующих излучений.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования были выбраны крупные и малые промышленные города Ростовской области: Ростов-на-Дону (областной центр), Новочеркасск, Таганрог, Волгодонск, Азов, Аксай, Сальск, Батайск, Новошахтинск и более 10 сельских поселений (СП) (Кулешовское сельское поселение, ст. Старочеркасская, х. Морской Чулек, ст. Стефанидинодар и др.). На территории каждого СП развита сельскохозяйственная деятельность, расположены объекты промышленности различного назначения, ведётся добыча полезных ископаемых. Последнее приводит к активному движению автотранспорта по территории СП, что способствует ухудшению экологической обстановки в районах исследования.

Все населенные пункты (НП) расположены в умеренном степном климате с жарким и сухим летом и мягкой зимой. Количество осадков достаточно велико осенью и весной, и крайне низкое летом.

Измерения МЭД гамма-излучения в населенных пунктах проводили методами пешеходной гамма-съемки как по оживленным центральным улицам, так и районах с малоэтажной застройкой («частный сектор») и в парковых зонах. Использовали поисковые дозиметры-радиометры СРП-88н, ДРБП-03 и ДКС-96 с блоком детектирования БДКС-96с.

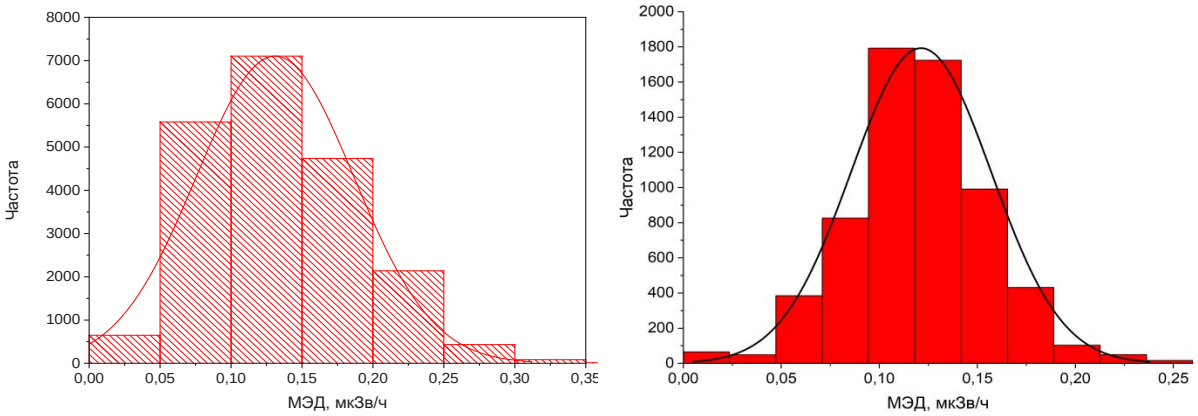


Рис. 1. Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в городах(а) и сельских поселениях (б) Ростовской области

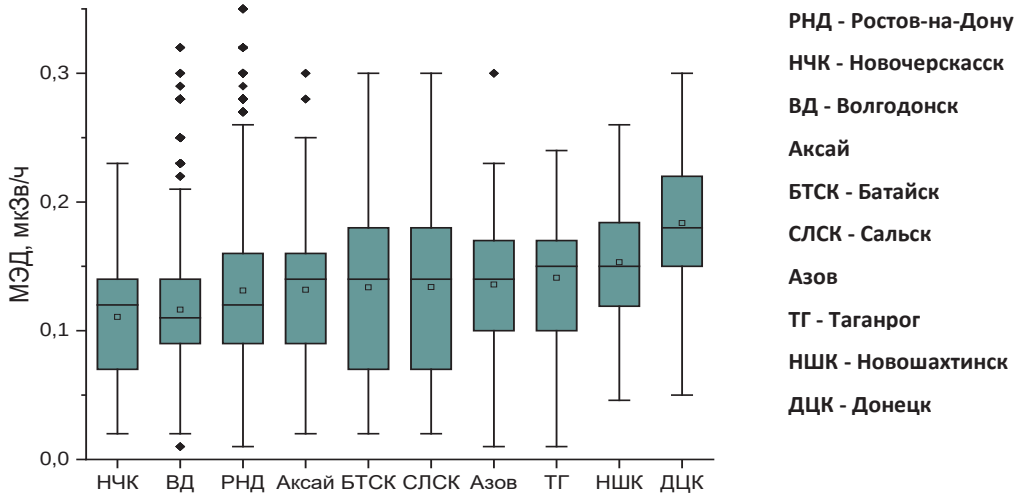


Рис. 2. Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в отдельных городах Ростовской области

Таблица 1. Результаты статистической обработки результатов измерения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в населенных пунктах Ростовской области

Параметр	Города	Сельские поселения
Минимум, мкЗв/ч	0,01	0,01
Максимум, мкЗв/ч	0,51	0,32
Среднее арифм., мкЗв/ч	**0,13**	**0,12**
Среднее геомет., мкЗв/ч	0,12	0,12
Медиана, мкЗв/ч	**0,13**	**0,12**
Мода, мкЗв/ч	**0,12**	**0,11**
Стандартная ошибка, мкЗв/ч	0,0003	0,0004
Количество измерений, шт	24478	6430

Таблица 2. Значения критериев соответствия законам распределения

Параметр	Значение
σ_{ln}	0,19
Критерий	0,19
ln(Me)	–1,96
ln(x)	–1,96
W^2	12,66
Соответствие закону	ЛН

Результаты и их обсуждение

Гамма-фон, обусловленный, в первую очередь, природными источниками ионизирующего излучения на урбанизированных территориях может повышаться за счет человеческой деятельности. При этом, в населенных пунктах с развитым сельским хозяйством дополнительную нагрузку в облучение могут вносить особенности отопления (в первую очередь, уголь), использование природных минеральных удобрений (например, фосфаты и др.) и строительных материалов с повышенным содержанием природных радионуклидов (природный камень, шлакоблоки).

Ниже, на рис. 1 и в Таблице 1 представлены результаты натурных измерений МЭД на открытых территориях в пределах населенных пунктов. На рис. 2 приведено распределение МЭД в отдельных городах Ростовской области.

Гамма-фон (рис. 1, рис. 2 и Табл. 1) в городских и сельских населенных пунктах как в целом по региону, так и в отдельных городах Ростовской области варьирует в достаточно широких пределах. Это может быть обусловлено как наличием угольных месторождений (г. Донецк и г. Новошахтинск), отделкой зданий и сооружений природными материалами (гранитные набережные, памятники и скульптуры в г. Ростове-на-Дону и в малых городах), загруженностью автотранспортом, наличием предприятий, работающих на угле (ТЭЦ, Новочеркасская ГРЭС) и др. При этом, практически все населенные пункты расположены в черноземной зоне, г. Волгодонск на границе черноземной и каштановой почвенных зон, Сальск – в каштановой зоне полусухих степей. Высота над уровнем моря – 0–100 м характерна для всех районов исследования. Дополнительные незначительные вклады в вариации гамма-фона могут быть связаны и с нерав-

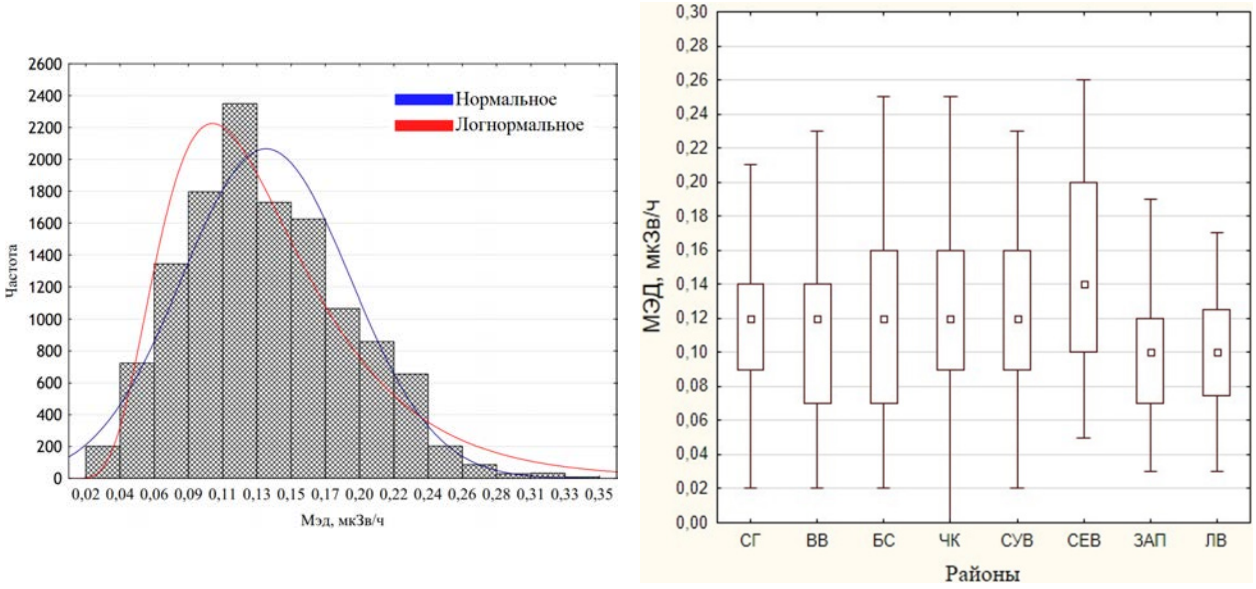


Рис. 3. Распределение МЭД в г. Ростове-на-Дону (а) и в отдельных районах г. Ростова-на-Дону (б). СГ – ж/р Стройгородок, ВВ – ж/р Военвед, БС – ж/р Болгарстрой, ЧК – ж/р Чкаловский, СУВ – мкр Суворовский, СЕВ – мкр Северный, ЗАП – мкр Западный, ЛВ – ж/к Левенцовский

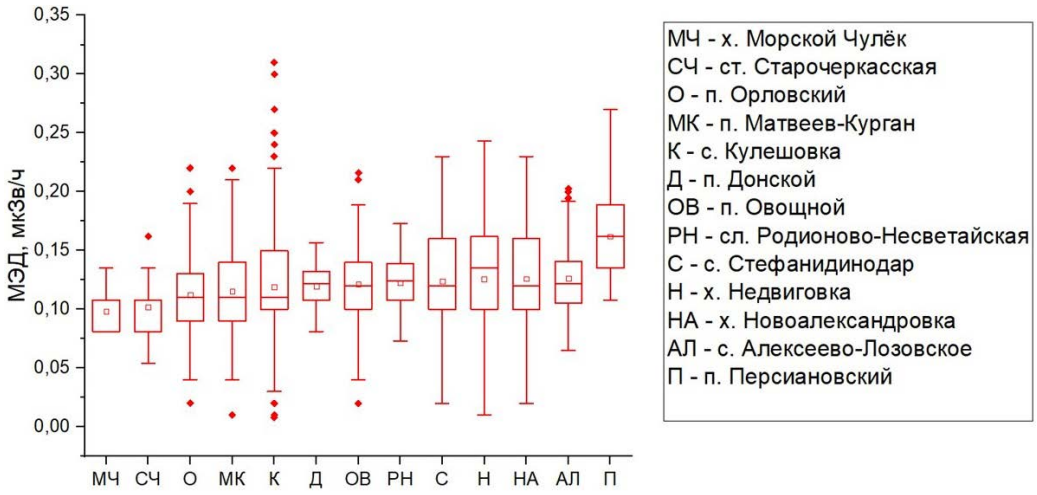


Рис. 4. Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в некоторых сельских поселениях Ростовской области

номерным выпадение радиоцезия на территории Ростовской области после аварии на Чернобыльской АЭС.

Ниже, на рис. 3 приведено распределение МЭД на территории г. Ростова-на-Дону и в отдельных его районах.

Представленное выше распределение соответствует логарифмически нормальному закону распределения. Для проверки соответствия закону применялись критерий Крамера-Мизеса-Смирнова и критерий соответствия логнормальному распределению при уровне значимости 0,01.

Так как выборка измеренных значений МЭД подчиняется логнормальному закону, то для описания среднего гамма-фона следует использовать среднее геометрическое значение МЭД, составляющее 0,13 мкЗв/ч, что согласуется с Нормами радиационной безопасности РФ НРБ-99/2009.

Все сельские поселения (кроме п. Орловский) Ростовской области расположены в черноземной зоне. Основное направление сельского хозяйства – выращивание зерновых культур (преимущественно пшеница). Территории в районе расположения п. Орловский относятся к каштановой зоне полусухих степей – на этой мониторинговой площадке развиты как животноводство, так и растениеводство. Некоторые населенные пункты (х. Морской Чулек) – представляют собой преимущественно дачные поселки. В подобных районах отсутствуют промышленные предприятия.

В целом, средний гамма-фон на территориях сельских поселений Ростовской области составляет 0,10–0,12 мкЗв/ч, что не превышает МЭД, регламентированный НРБ-99/2009. При этом максимальные вариации МЭД фиксируются в п. Кулешовке, а максимальные средние значения МЭД – в п. Персиановский. Через данные населенные пункты проходят достаточно оживленные автотрассы, в непосредственной близости от п. Персиановский расположена Новочеркасская ГРЭС [8], часть блоков которой работают на углях. Не стоит исключать и смешанное (углем и газом) отопление жилых зданий в сельских поселениях, использование строительных материалов с повышенным содержанием естественных радионуклидов и активное использование природных минеральных удобрений в сельскохозяйственной деятельности. Также в распределении гамма-фона значимую роль играет радионуклидный состав почв [9, 10].

Ниже, на рис. 5 представлены особенности распределения гамма-фона в г. Ростов-на-Дону, сельских поселениях и малых городах Ростовской области.

Несмотря на различия в пределах вариации МЭД в населенных пунктах с разной степенью урбанизации, средние арифметические и средние геометрические значения гамма-фона как в Ростове-на-Дону, так и в малых городах и селах составляют 0,12–0,13 мкЗв/ч. Эти данные полностью согласуются в преде-

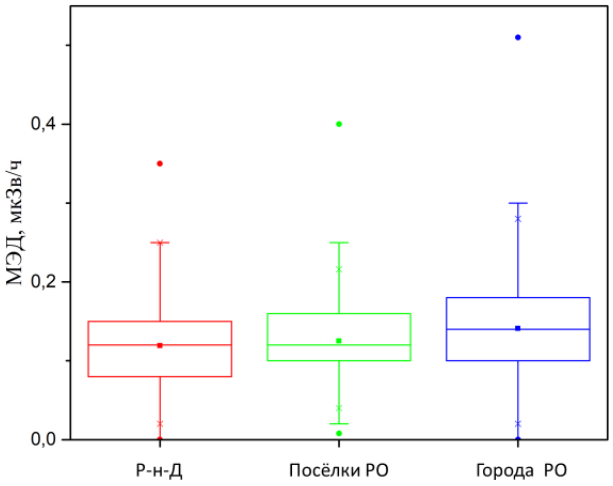


Рис. 5. Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в населенных пунктах Ростовской области с различной степенью урбанизации

лах неопределенности измерений (0,02 мкЗв/ч), что может свидетельствовать о достаточно равномерном и однородном распределении гамма-фона на урбанизированных территориях Ростовской области

Заключение

В заключение необходимо отметить, что на вариации мощности эквивалентной дозы гамма-излучения значительное влияние оказывают не только геолого-климатические и почвенные характеристики региона исследования, но и наличие промышленности, месторождений полезных ископаемых, использование строительных материалов с повышенным содержанием естественных радионуклидов и множество других факторов. На территориях с различной степенью урбанизации необходимы длительные мониторинговые исследования не только гамма-фона на открытой местности, но и оценка радоноопасности жилых помещений, анализ радиоактивности строительных материалов, почвы и продуктов питания для расчетов степени облучения населения от природных источников ионизирующих излучений.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ 20-55-05014 Арм_а.

Литература

1. UNSCEAR. Report to the General Assembly. Sources and Effects of Ionizing Radiation (United Nations, New York), 2000. – V. I: Sources. – 659 p.
2. Al-Saleh F. S. Measurements of indoor gamma radiation and radon concentrations in dwellings of Riyadh city, Saudi Arabia. / F. S. Al-Saleh // Appl. Radiat. Isot, 2007. – V.65. – P. 843–848.
3. Almgren S. Gamma radiation doses to people living in Western Sweden. / S. Almgren, M. Isaksson, L. Barregard // J. Environ. Radioact, 2008. – V. 99. – P. 394–403.
4. Bossew P. Estimating the terrestrial gamma dose rate by decomposition of the ambient dose equivalent rate. / P. Bossew, G. Cinelli, M. Hernández-Ceballos, N. Cernohlawek, V. Gruber, B. Dehandschutter, F. Menneson, M. Bleher, U. Stöhlker, I. Hellmann, F. Weiler, T. Tollefsen, P. V. Tognoli, M. de Cort // J. Environ. Radioact, 2017. – V. 166. – P. 296–308.
5. Erlandsson B. Urban dose rates at Gavle, Gotteborg and Lund. / B. Erlandsson, M. Isaksson // J. Environ. Radioact, 2006. – V. 85. – P. 241–246.
6. Lust M. Determination of dose rate from Chernobyl-derived radiocaesium in Estonian soil. / M. Lust, E. Realo // J. Environ. Radioact, 2012. – V. 112. – P. 118–124.
7. Stegnar P. Assessment of the radiological impact of gamma and radon dose rates at former U mining sites in Central Asia. / P. Stegnar, I. Shishkov, M. Burkitbayev, B. Tolongutov, M. Yunusov, R. Radyuk, B. Salbu // J. Environ. Radioact, 2013. – V. 123. – P. 3–13.
8. Бураева Е. А. Радионуклиды в наземных экосистемах природно-техногенной территории Новочеркасской ГРЭС. / Е. А. Бураева, В. В. Чеченатова., А. И. Саевский, Т. А. Михайлова, Е. А. Кащаева, В. А. Чаплыгин, Ю. А. Литвинов, Т. М. Минкина // Экология промышленного производства, 2020. – Вып. 3 (111). – С. 45–49.
9. Федченко Т. М. Содержание и распределение радионуклидов в почвах территории Новочеркасской ГРЭС. / Т. М. Федченко, Е. А. Бураева, Т. М. Минкина, А. Н. Триболина, В. С. Нефедов, С. В. Мартыненко // Фундаментальные исследования, 2013. – № 11 (3). – С. 488–492.
10. Бураева Е. А. Содержание и распределение естественных радионуклидов в различных типах почвы Ростовской области / Е. А. Бураева, В. С. Малышевский, Е. И. Шиманская, Т. В. Вардуни, А. Н. Триболина, А. А. Гончаренко, Л. Ю. Гончарова, В. С. Тоцкая, В. С. Нефедов // Современные проблемы науки и образования, 2013. – № 4. URL: www.science-education.ru/110-9652.

КАДРОВЫЙ РЕЗЕРВ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОГО ДИВИЗИОНА ЯДЕРНОЙ ОТРАСЛИ

А. А. Верчеба, П. А. Игнатов, О. В. Каржева

Российский государственный геологоразведочный университет
Москва. Россия, verchebaaa@mgri.ru

PERSONNEL RESERVE OF THE GEOLOGICAL EXPLORATION DEPARTMENT OF NUCLEAR INDUSTRY

A. A. Vercheba, P. A. Ignatov, O. V. Karjeva

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
verchebaaa@mgri.ru

The article describes the development of the geological shots' preparation system at a new stage. It also considers the value of higher education in the realization of development strategy for Russian mineral resources until 2035. The associativity of competencies of graduates of geological higher education institutions to modern qualifying characteristics of geological cluster experts is analysed.

Введение

Высшее горно-геологическое образование опирается на традиции, заложенные при формировании корпуса горных инженеров в уникальном учебном заведении России – Санкт-Петербургском горном университете, первом в России высшем техническом учебном заведении, основанном Указом императрицы Екатерины II в 1773 году, как воплощение идей Петра I и М. В. Ломоносова о подготовке собственных специалистов для развития горного дела и горных наук.

В XXI веке подготовка горных инженеров проводится более чем в 50 университетах, институтах, их филиалах и факультетах.

Практическая направленность российского высшего геологического образования обусловлена достижениями в создании минерально-сырьевой базой России, обеспечивающей могущество страны и национальную экономическую безопасность на перспективу [1].

Материалы и методы

Для успешного развития геологоразведочной отрасли ей необходимо решить комплекс научно-производственных, управленческих и образовательных задач [2]:

- формирование научного обоснования для надёжного ресурсного обеспечения предприятий минерально-сырьевого комплекса и потребностей экспорта минерально-сырьевых ресурсов,
- создание эффективной системы управления отраслью для укрепления взаимосвязи государства и недропользователей,
- развитие взаимодействия академической, отраслевой науки и высшего образования, формирование профессионального кадрового состава геологической службы России,
- объединения усилий вузов, отраслевых и научных государственных бюджетных учреждений, в деле подготовки специалистов-геологов высокой квалификации;
- ускоренного технологического развития геологического изучения недр и импортозамещения геолого-геофизического оборудования и приборов.

Документом, определяющим перспективы развития отрасли на длительную перспективу, утвержденным распоряжением Правительства Российской Федерации 22.12.2018 г. № 2914 является Стратегия развития минерально-сырьевой базы России до 2035 года (далее Стратегия), где представлена дорожная карта поэтапного и последовательного воспроизводства природных и минеральных богатств страны [3].

Стратегией предусмотрено наращивание минерально-сырьевой базы за счёт увеличения инвестиционной привлекательности горных и геологоразведочных работ всех стадий, роста качества прогнозирования и поисков новых месторождений, повышения эффективности освоения известных, в том числе неразрабатываемых, месторождений путём внедрения современных технологий переработки, обогащения и комплексного извлечения полезных ископаемых, повышение уровня геологической изученности страны. Это потребует изменения в развитии образовательных траекторий высшего геологического образования России и формирования отраслевой системы непрерывного геологического образования на базе создания специализированных базовых кафедр и центров компетенций при Вузах, научно-исследовательских и производственных организациях.

Вузовское сообщество откликнулось на эти сложные для реализации и масштабные по проблематике задачи и параллельно с разработкой Стратегии в 2020 году был утвержден Минобрнауки России Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования (ФГОС ВО-2020) – специалитет по специальности Прикладная геология, являющийся ориентиром подготовки высококвалифицированных кадров для воспроизводства, развития и использования минерально-сырьевой базы страны на длительный период.

Отличительной особенностью ФГОС ВО-2020 является то, что вуз определяет требования к результатам ее освоения образовательной программы в виде индикаторов формирования универсальных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций выпускников (далее – компетенции).

Компетентностный подход к оценке результатов высшего геологического образования и реализация принципа сопряженности компетенций выпускников вузов с квалификационными требованиями и трудовыми функциями специалистов геологов принципиально отличает эту модель образования от образовательных стандартов прошлого века. Это позволяет настроить образовательные программы на востребованные типы профессиональной деятельности: научно-исследовательскую, проектно-изыскательскую, производственно-технологическую, педагогическую и организационно-управленческую.

Установленные компетенции выпускников вузов, отражающие результаты освоения программы высшего образования построены по иерархическому принципу от универсальных для горно-геологической отрасли, общепрофессиональных, учитывающих требования профессиональной инженерной подготовки и профессиональных, отражающих особенности обучения по специализациям. Универсальные компетенции отражают формирование у выпускников естественно-научного мировоззрения, а общепрофессиональные и профессиональные оценивают их знания и навыки в одном из типов будущей профессиональной деятельности. Например, по Прикладной геологии месторождений твёрдых полезных ископаемых подготовка специалистов будет осуществляться по следующим специализациям выпускников:

- геологическая съемка, поиски и разведка месторождений твердых полезных ископаемых;
- разведка и оценка стратегических видов полезных ископаемых;
- прикладная геохимия, минералогия и геммология.

Нами были проанализированы установленные в ФГОС ВО-2020 универсальные и общепрофессиональные компетенции выпускников на их сопряженность с приоритетными направлениями научно-технологического развития (НТР) России, относящимися к развитию минерально-сырьевого комплекса [3]. К таким приоритетным направлениям относятся:

- переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта;
- переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии;
- связанность территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики.

По первому направлению образовательными программами предусмотрено формирование следующих компетенций выпускников:

- способность работать с программным обеспечением общего, специального назначения, в том числе моделировать горные и геологические объекты;
- способность применять основные методы, способы и средства получения, хранения и обработки информации, используя навыки работы с компьютером как средством управления информацией.

Второе приоритетное направление научно-технологического развития в образовательных программах будет отражено в освоении такой универсальной компетенции выпускника, как способность создавать и поддерживать в повседневной жизни и в профес-

Рис. 1. Студенты специализации геологическая съемка, поиски и разведка месторождений твердых полезных ископаемых

сиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества, в том числе при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов.

Ко второму приоритетному направлению научно-технологического развития следует отнести формирование следующих общепрофессиональных компетенций выпускников:

• способность применять правовые основы геологического изучения недр и недропользования, обеспечения экологической и промышленной безопасности и умение их учитывать при поисках, разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых, а также строительстве;

• способность применять методы обеспечения безопасности жизнедеятельности, в том числе в условиях чрезвычайных ситуаций, при производстве работ по геологическому изучению недр, поискам, разведке, добыче и переработке полезных ископаемых, промышленно-гражданскому строительству.

Третье приоритетное направление научно-технологического развития России в минерально-сырьевом секторе реализуется предусмотренными Стратегией развития минерально-сырьевой база России мероприятиями по проведению геологоразведочных работ в Арктике. В связи с изменением климата начнется эффективное использование Северного Морского пути, что будет способствовать диверсификации экономики региона, повышению технологического уровня, а также дальнейшему развитию и освоению МСБ Арктической зоны Российский Федерации [3, 4]. Для формирования навыков по освоению МСБ северных территорий России в ФГОС ВО-2020 были включены общепрофессиональные компетенции выпускника:

• способность применять основные положения естественных наук и научных теорий при проведении научно-исследовательских работ по изучению и воспроизводству минерально-сырьевой базы;

• способность применять навыки анализа горно-геологических условий при поисках, оценке, разведке и добыче полезных ископаемых, а также при гражданском строительства.

Результаты и их обсуждение

Выполнение основных приоритетных направлений развития науки и технологий при осуществлении государственной научно-технологической политики позволит сформировать индикаторы компетенций, необходимых для перехода к реализации новых приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации, отвечающих на большие вызовы современной цивилизации.

Заключение

Сопряженность установленных компетенций выпускников вузов, установленных в федеральных государственных образовательных стандартах высшего образования как индикатора совокупности горно-геологических знаний, навыков и умений с приоритетными направлениями научно-технологического развития России позволяет считать, что образовательные технологии, разработанные в ФГОС ВО-2020 будут способствовать подготовке профессионалов, готовых непосредственно после окончания вуза работать в сфере практического развития минерально-сырьевого комплекса.

Литература

1. Верчеба А. А., Оганесян Л. В. Пути совершенствования высшего геологического образования. Разведка и охрана недр, 2016. – № 12. – С. 3–8.
2. Геология будущего. Геологическая отрасль Российской Федерации к началу 2050-х годов. Информационно-аналитические материалы. – Москва: АО «Росгеология», 2017. – 84 с.
3. Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22 12. 2018 г. – № 2914-р.
4. О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации – Указ Президента РФ от 01.12.2016. – № 642.

УРАН И ТОРИЙ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ (ПРИМОРСКИЙ КРАЙ)

А. В. Ветошкина[1,2], И. Ю. Чекрыжов[1], А. М. Паничев[2], Е. А. Вах[3]

[1]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН
Владивосток, Россия vetoshkina.alena@mail.ru, chekr2004@mail.ru
[2]Тихоокеанский институт географии ДВО РАН
Владивосток, Россия sikhote@mail.ru
[3]Тихоокеанский институт океанологии им. Ильичева ДВО РАН
Владивосток, Россия adasea@mail.ru

URANIUM AND THORIUM IN NATURAL WATERS OF THE CENTRAL SIKHOTE-ALIN (PRIMORSKY TERRITORY)

A. V. Vetoshkina[1,2], I. Yu Chekryzhov[1], A. M. Panichev[2], E. A. Vakh[3]

[1]Far East Geological Institute FEBRAS
Vladivostok, Russia vetoshkina.alena@mail.ru, chekr2004@mail.ru
[2]Pacific Institute of Geography FEBRAS
Vladivostok, Russia sikhote@mail.ru
[3]V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEBRAS
Vladivostok, Russia adasea@mail.ru

This article examines the content and balance of uranium and thorium in natural waters of three regions of the central Sikhote-Alin in the Primorsky Territory: «Shanduy», «Vancin», «Bikin». The studied natural waters are too ultrafresh and fresh with average mineralization of 52.4 mg/l. The U content in waters ranges from 0.005 to 1.067 μg/l. The concentration in water varies from 0.003 to 2.299 μg/l. The thorium-uranium ratio in waters varies from 0.011 to 5.245. A positive relationship was found between the content of thorium in the waters and the number of rare earth elements.

Введение

В результате массового внедрения в аналитические работы метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) и других современных методов стало возможным одновременное и прецизионное определение содержания урана (U) и тория (Th) в водах. С. Л. Шварцев в своей обобщающей работе [9] привел сводные данные по абсолютным содержаниям этих элементов в воде. На основе этих данных С. И. Арбузовым и Л. П. Рихвановым [1] были рассчитаны показатели торий-уранового отношения, как важного геохимического индикатора этих родственных химических элементов, поведение которых близко в эндогенных магматических и высокотемпературных флюидных процессах и различно в водной среде в экзогенных условиях. Современные оценки растворенной части этих элементов в речных водах говорят о преобладании U в воде, но в то же время исследователями приводятся примеры водных источников в которых содержание Th больше, чем U. Так например, отношение Th к U (Th/U) в поверхностных водах некоторых районов Сибири колеблется от 0,01 до 5,24 [4]. В терминах радиогеохимии можно сказать, что природа радиоактивности воды колеблется от урановой (Th/U < 1), смешанной торий-урановой до ториевой (Th/U > 5) [1]. Сложная картина баланса Th и U в природных водах различного состава и важность этих элементов как индикаторов для гидрогеохимических построений и выводов определяет актуальность их изучения в разных регионах с использованием современных аналитических методов.

Краткая характеристика исследованных районов

В настоящей статье рассматривается содержание и баланс урана и тория в природных водах трех районов центрального Сихотэ-Алиня на территории Приморского края (рис. 1).

Поскольку работы проводились в рамках междисциплинарного проекта РНФ «Влияние литолого-геохимической специфики горных ландшафтов Сибири и Дальнего Востока на формирование элементного состава организма млекопитающих» то выбор для исследований именно этих районов был обусловлен наличием на их территории многочисленных природных солонцов – кудуров приуроченных к выходам на поверхность кайнозойских кислых пирокластических пород и минерализованных вод и, соответственно, повышенной литофагиальной активностью диких копытных животных.

Первый исследованный район (далее по тексту – район «Бикин») находится на водоразделе между верховьями рек Бикин и Максимовка, в юго-восточной части национального парка Бикин, в пределах Верхнебикинской палеовулканоструктуры, сложен-

Рис. 1. Местоположение районов исследования: 1 – «Бикин»; 2 – «Шандуй»; 3 – «Ванчин»

ной преимущественно кислыми вулканитами верхнемелового и раннекайнозойского возраста. В меньшей степени на площади участка распространены среднекайнозойские вулканиты контрастной серии, а также вулканогенно-осадочные и осадочные слабоугленосные отложения. На площади участка отмечены отдельные проявления золота, олова и полиметаллов.

Второй район (далее по тексту – район «Шандуй») расположен в центральной части хребта Сихотэ-Алинь на северо-восточной части территории Сихотэ-Алинского государственного биосферного заповедника и включает г. Солонцовая (Шандуй), верховья р. Заболоченной и правых притоков р. Таежной. Гора Солонцовая и ее окрестности являются руинами палеоценового Солонцовского (Шандуйского) палеовулкана и сложены кислыми и средними вулканитами с резким преобладанием их пирокластических разновидностей. Рудная минерализация представлена проявлениями золота и серебра [2].

Третий район исследований (далее – район «Ванчин») находится в южной части горного хребта Сихотэ-Алинь, на территории национального парка «Зов тигра» и охватывает бассейн верховьев р. Милоградовка (Ванчин). Большая часть исследованного района находится в пределах ручья Угольного (правый приток Милоградовки), дренирующего отложения Ванчинской вулкано-тектонической угленосной впадины. Впадина образовалась в раннем кайнозое и заполнена вулканогенно-осадочными и терригенными отложениями преимущественно палеоценового и эоценового возраста с маломощными пластами бурых углей. В северо-восточной части к впадине подступает среднегорье с отметками до 1305 м (г. Фасольная), сложенное преимущественно верхнемеловыми и раннекайнозойскими вулканитами. Характерной особенностью этого района является наличие многочисленных рудопроявлений золота, серебра, олова, полиметаллов, а также германиевой и уникальной редкоземельной минерализации в углях [7, 8].

Материалы и методы

Материалы исследований были получены в рамках полевых работ в июле и сентябре 2020 г. Всего в трех исследованных районах было отобрано 122 пробы воды из местных водотоков и родников, в том числе на источниках, приуроченных к природным солонцам – кудурам. Вода отбиралась в полиэтиленовые емкости 250 мл, которые во время полевых работ (не более 5 суток) хранились в автомобильном холодильнике. Подготовка проб воды к анализам выполнялась в лаборатории геохимии Тихоокеанского института географии ДВО РАН. Каждая проба фильтровалась (45 микрон) с помощью вакуумного насоса и разливалась в две пробирки (полипропилен) емкостью 100 мл. Из оставшейся навески каждой пробы (50 мл) выполнялись определения pH, HCO_3^-, содержания растворенного органического углерода и показателя проводимости. Далее пробы воды, разлитые в две одинаковые пробирки, направлялись в Аналитический центр коллективного пользования при Дальневосточном геологическом институте ДВО РАН. Одна из пробирок после подкисления воды особо чистой азотной кислотой шла на определение состава 55 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС, спектрометр Agilent 7700x, Agilent Techn., США). Вторая пробирка шла на определение 5 макрокатионов методом атомно-эмиссионной спектрометрии (спектрометр iCAP 7600 Duo), а также 6 анионов методом ионной хроматографии (ионный жидкостный хроматограф LC-20, Shimadzu, Япония). Общая минерализация воды (∑n) определялась как сумма макрокомпонентов: $\sum n = [Na^+] + [K^+] + [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Si^{4+}] + [SO_4^{2-}] + [Cl^-] + [HCO_3^-]$.

Результаты и обсуждение

Исследованные водотоки приурочены к районам проявления природных солонцов – кудуров. Кудуры – это геолого-ландшафтные комплексы, которые регулярно посещают дикие животные с целью употребления горных пород и минерализованных родниковых вод; следовательно, кудуриты – это литогенные вещества, потребляемые животными на кудурах [11]. Исследования последних лет показали, что районы, где распространены кудуры, представляют собой ландшафтные редкоземельные аномалии, как правило, связанные с метасоматически измененными и оглиненными кислыми вулканитами [12, 13].

Все изученные водотоки в трех районах являются ультрапресными и пресными с минерализацией не более 280 мг/л, преимущественно ультрапресными со средней минерализацией 52,4 мг/л. Содержа-

ние редкоземельных элементов (РЗЭ) имеет в водах большую вариабельность, так сумма всех РЗЭ в воде изменяется от 0,033 мкг/л до 31,33 мкг/л. Содержание U в водах колеблется от минимального значения 0,005, достигая максимального 1,067 мкг/л. Концентрация Th в воде также имеет широкий разброс значений от 0,003 до 2,3 мкг/л. Торий-урановое отношение в водах изменяется от 0,011 до 5,25.

Поверхностные воды района «Бикин» гидрокарбонатные, по катионному составу преобладают натриево-магниево-кальциевые (рис. 2). Воды преимущественно ультрапресные, пресные с максимальной минерализацией до 278 мг/л. По показателю pH воды от нейтральных до слабощелочных: 6,45–7,9.

Содержание урана в природных водах района «Бикин» изменяется от 0,006 до 0,336 мкг/л, при его среднем содержании 0,059 мкг/л (табл. 1). Содержание тория колеблется от 0,003 до 0,416 мкг/л, средняя концентрация составляет 0,032 мкг/л. Th/U изменяется от 0,011 достигая максимального значения 4,56, в среднем составляет 0,729. Изменение концентрации тория в воде коррелирует с распределением редкоземельных элементов в воде (рис. 3).

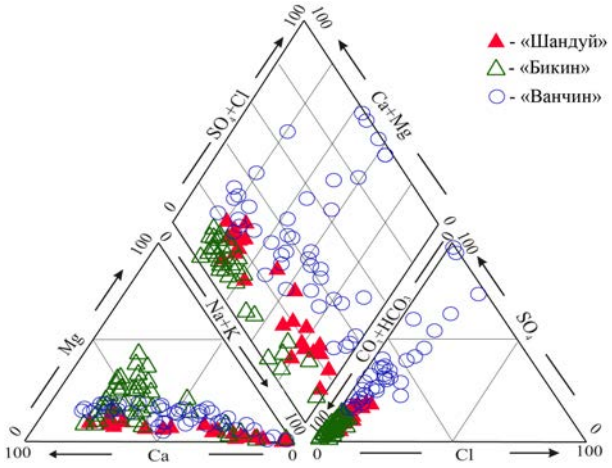


Рис. 2. Диаграмма Пайпера для вод обследованных районов

В целом, в водах Бикинского района исследований содержание урана в природных водах выше, чем содержание тория. Максимальные Th/U отношения отмечены в водах: левого притока руч. Буреломный (4,5); устья р. Лосевка и устья 5-го сверху ключа справа по р. Пещерка (2,2); устья 3-го левого ключа сверху по р. Правая Пещерка (1,6); устьев руч. Солонцовый и Староверский, ручья на солонеце Неожиданный (1,2); правого притока руч. Староверский (1,01); ручья на солонце Директорском (1,0).

Поверхностные воды района «Шандуй» также ультрапресные, значения минерализации изменяются от 20,8 до 65,1 мг/л; по показателю pH воды нейтральные: pH от 6,00 до 7,46. По макрокомпонентному составу воды натриево-кальциевые гидрокарбонатные, но также встречаются чисто натриевые воды (рис. 2). Содержание урана в природных водах района «Шандуй» изменяется от 0,018 до 1,067 мкг/л, при его среднем содержании 0,147 мкг/л. Содержание тория колеблется от 0,0065 до 0,863 мкг/л, средняя концентрация составляет 0,122 мкг/л. Торий-урановое отношение в водах изменяется от 0,226 до 1,64 при среднем значении отношения 0,748. Так же, как в водах района «Бикин», здесь прослеживается прямая зависимость содержания тория в воде от содержания редкоземельных элементов (рис. 3).

Поверхностные воды района «Ванчин» являются ультрапресными с минерализацией до 134 мг/л. Воды гидрокарбонатно-натриево-кальциевые с присутствием сульфат- и хлорид-ионов. Воды обследованного района кислые и нейтральные (pH от 3,5 до 7,0). Большинство вод слабокислые с pH 5,4–6,4, что характерно для малых водотоков лесной зоны. Группа кислых источников (3 пробы), скорее всего, приурочена к зоне окисления сульфидных руд и расположена локально. Для этих вод характерно преобладание сульфат-ионов, повышенных концентраций Al, Fe, Mn, Zn, Co, Ni и РЗЭ. Для водотоков Ванчинской впадины характерно преобладание тория в воде над ураном. В целом по массиву проанализированных проб (56 проб) среднее значение торий-уранового отношения составляет 2,09 и колеблется от 0,162 до

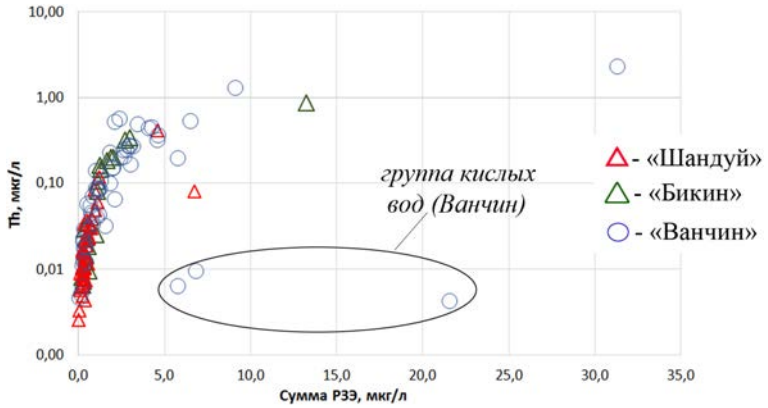


Рис. 3. Зависимость распределения тория от суммы РЗЭ в водах исследованных районов

5,25 (табл. 1). Содержание урана в природных водах района «Ванчин» варьирует от 0,005 до 0,720 мкг/л, при его среднем содержании 0,086 мкг/л. Содержание тория колеблется от 0,004 до 2,30 мкг/л, при среднем значении 0,201 мкг/л.

Установлено, что концентрация тория и урана в водах с различной кислотностью различается. Все пробы воды района «Ванчин» были поделены на три группы: слабокислые с pH 5,4–6,0; нейтральные с pH 6,5–7,0 и кислые с pH 3,5–3,9. Большая часть проб относится к группе со слабокислым показателем pH. В этой группе проб отчетливо прослеживается преобладание тория в воде в три и более раза, чем урана. Так, содержание урана в природных водах района «Ванчин» со слабокислым значением pH изменяется от 0,006 до 0,720 мкг/л, при его среднем содержании

Таблица 1. Распространенность урана и тория в природных водах исследованных районов

Район исследований	pH	Параметры	M, мг/л	Сумма REE, мкг/л	Th, мкг/л	U, мкг/л	Th/U
Район «Бикин»	6,45–7,9	мин	32,2	0,03	0,003	0,006	0,011
		макс	278,5	6,73	0,416	0,336	4,56
		сред	80,7	0,67	0,032	0,059	0,729
		медиана	65,7	0,35	0,015	0,038	0,429
		число проб	43	43	43	43	43
Район «Шандуй»	6,0–7,46	мин	20,8	0,20	0,007	0,018	0,226
		макс	65,1	13,3	0,86	1,07	1,64
		сред	38,8	1,52	0,122	0,147	0,748
		медиана	37,8	0,62	0,863	0,052	0,664
		число проб	23	23	23	23	23
Район «Ванчин»	3,5–7,0	мин	6,0	0,08	0,004	0,005	0,162
		макс	134,6	31,3	2,30	0,720	5,25
		сред	36,2	2,97	0,201	0,086	2,09
		медиана	31,4	1,45	0,083	0,035	2,18
		число проб	56	56	56	56	56

Таблица 2. Распространенность урана и тория в природных водах в зависимости от pH на примере Ванчинской впадины

Район исследований	pH	Параметры	M, мг/л	Сумма REE, мкг/л	Th, мкг/л	U, мкг/л	Th/U
группа слабокислых вод	5,4–6,5	мин	6,0	0,31	0,021	0,006	0,926
		макс	134,6	31,3	2,23	0,720	5,25
		сред	30,8	3,11	0,252	0,089	3,04
		медиана	26,5	1,98	0,147	0,041	3,27
		число проб	37	37	37	37	37
группа нейтральных вод	6,5–7,0	мин	15,4	0,08	0,005	0,005	0,228
		макс	71,9	4,11	0,516	0,236	4,98
		сред	47,1	1,08	0,123	0,071	1,33
		медиана	46,1	0,43	0,018	0,024	0,846
		число проб	15	15	15	15	15
группа кислых вод	3,5–3,9	мин	42,8	5,78	0,004	0,012	0,162
		макс	67,8	21,6	0,010	0,026	0,669
		сред	52,3	11,4	0,007	0,017	0,456
		медиана	46,3	6,84	0,006	0,014	0,537
		число проб	3	3	3	3	3

0,089 мкг/л. Содержание тория колеблется от 0,021 до 2,30 мкг/л, средняя концентрация составляет 0,252 мкг/л. Торий-урановое отношение варьирует от 0,926 до 5,25, среднее значение составляет 3,04 (табл. 2). Содержание урана в нейтральных природных водах района Ванчинской впадины изменяется от 0,005 до 0,236 мкг/л, при его среднем содержании 0,071 мкг/л. Содержание тория колеблется от 0,005 до 0,516 мкг/л, средняя концентрация составляет 0,123 мкг/л. Торий-урановое отношение варьирует от 0,228 до 4,98, среднее значение составляет 1,33 (см. табл. 2). С уменьшением pH урана в воде становится больше, чем тория (см. табл. 2). Таким образом, в группе кислых источников, расположенных в зоне окисления сульфидных руд содержание урана, составляет от 0,012 до 0,026 мкг/л, при его среднем содержании 0,017 мкг/л. Содержание тория – от 0,004 до 0,010 мкг/л, средняя концентрация составляет 0,007 мкг/л. Торий-урановое отношение варьирует от 0,162 до 0,669, среднее значение составляет 0,456. Несмотря на высокое содержание редкоземельных элементов в данной группе источников, концентрации урана и тория значительно ниже, чем в водах других групп Ванчинской впадины.

Положительная зависимость между содержанием в водах тория и количеством редкоземельных элементов, отмечаемая в двух предыдущих районах, также характерна и для слабокислых и нейтральных вод Ванчинской впадины (см. рис. 3).

По опубликованным данным содержание урана в речных водах составляет для урана – 0,4–0,5 мкг/л [3, 6, 10], для тория – 0,1 мкг/л [5, 10]. Торий-урановое отношение при этом близко к среднему значению для осадочных горных пород и на треть ниже среднего для земной коры. При низкой растворимости тория в водах этот факт говорит о том, что значительная доля урана и особенно тория в речных водах мигрирует в составе взвеси.

Выводы

Анализ распространенности урана и тория в природных водах центрального Сихотэ-Алиня показывает широкую вариабельность в распределении радиоактивных элементов. Это определяется, как миграционными особенностями элементов в условиях гипергенеза, так и процессами перераспределения тория и урана в воде и донных отложениях. Вероятными причинами преобладания тория над ураном в изученных природных водах, могут быть различные формы их нахождения в водных пробах (наличие остаточных минеральных взвесей после стандартной фильтрации), а также возможно и специфика самих проб (высокая кислотность или щелочность и др.). Отрицательная корреляция малорастворимого тория и РЗЭ в обогащенных РЗЭ водах свидетельствует о преимущественно растворенной (подвижной) форме нахождения РЗЭ в таких источниках, к которым часто приурочены природные солонцы-кудуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 20-67-47005.

Литература

1. Арбузов С. И., Рихванов Л. П. Геохимия радиоактивных элементов: учебное пособие, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 4-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – 341 с.
2. Ветренников В. В. Геологическое строение Сихотэ-Алинского государственного заповедника и центрального Сихотэ-Алиня. – http://sixote-alin.ru/books/vetrenn/intro.html.
3. Иванов В. В. Экологическая геохимия элементов. Кн. 6. Редкие f-элементы. – М.: Экология, 1997. – 607 с.
4. Копылова Ю. Г., Гусева Н. В., Аракчаа К. Д., Хващевская А. А., Мазурова И. С., Аюнова О. Д., Ойдуп Ч. К., Рычкова К. М. Уран и торий в природных водах юго-востока Алтае-Саянской области. Материалы V Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», г. Томск, 2016.
5. Корж В. Д. Закономерности формирования элементного состава гидросферы // Доклады АН СССР. – Т. 303. – 1988. – № 2 – С. 467.
6. Овчинников Л. Н. Прикладная геохимия. – М.: Недра, 1990. – 248 с.
7. Середин В. В., Чекрыжов И. Ю., Рудоносность Ванчинского грабена // Геология рудных месторождений, 2011. – Т. 53. – № 3. – С. 230–249.
8. Чекрыжов И. Ю., Попов В. К., Паничев А. М., Середин В. В., Смирнова Е. В. Новые данные по стратиграфии, вулканизму и цеолитовой минерализации Ванчинской впадины, Приморский край // Тихоокеанская геология, 2010. – Т. 29. – № 4. – С. 45–63.
9. Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. – 380 с.
10. Ярошевский А. А. Кларки геосфер // Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. – М.: Недра, 1990. – С. 7–14.
11. Panichev A. M., Golokhvast K. S., Gulkov A. N., Chekryzhov I. Yu Geophagy in animals and geology of kudurs (mineral licks): a review of Russian publications // Environ Geochem Health, 2013. – Vol. 35. – № 1. – P. 133–152.
12. Panichev A. M., Popov V. K., Chekryzhov I. Yu., Seryodkin I. V., Stolyarova T. A., Zakusin S. V., Sergievich A. A., Khoroshikh P. P. Rare earth elements

upon assessment of reasons of the geophagy in Sikhote-Alin region (Russian Federation), Africa and other world regions // Environ Geochem Health, 2016. – Vol. 38. – № 6. – P. 1255–1270.
13. Panichev A. M., Seryodkin I. V., Zaumyslova O. Yu., Wach E. A., Stolyarova T. A., Sergievich A. A., Popov V. K., Chekryzhov I. Yu., Blokhin M. G., Khoroshikh P. P. Results of geological and geochemical investigations of Kaplanov kudurs in Sikhote-Alin, Russian Far East // Arabian Journal of Geosciences, 2018. – Vol. 11 (17): 493. DOI: 10.1007/s12517-018-3820-z.

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ г. БОЛЬШОЙ КАМЕНЬ В ПРИМОРСКОМ КРАЕ

А. В. Ветошкина

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН
Владивосток, Россия vetoshkina.alena@mail.ru

RADIOECOLOGICAL RESEARCH IN THE TERRITORY OF THE BOLSHOI KAMEN IN PRIMORSKY KRAI

A. V. Vetoshkina

Far East Geological Institute FEBRAS
Vladivostok, Russia vetoshkina.alena@mail.ru

Radioecological studies have been carried out on the territory of Bolshoy Kamen, and the specific content of ^{137}Cs, ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K in soils has been assessed. The obtained data on the radioecological state on the territory of the urban district Bolshoy Kamen can be used as background data characterizing the state of the residential area.

Введение

В настоящее время городской округ (ГО) Большой Камень стал одним из важнейших центров экономического развития на Дальнем Востоке. На территории городского округа создана территория опережающего развития ТОР «Большой Камень». Главным резидентом ТОР «Большой Камень» является ООО ССК «Звезда». Судостроительный комплекс «Звезда» становится крупнейшей в России верфью, предназначенной для строительства всех типов морских судов и добычных платформ для работы на российском шельфе. Территория, отведенная под строительство ССК «Звезда», резидента ТОР «Большой Камень», находится на ранее освоенных землях городского округа Большой Камень Приморского края. Интенсивное освоение территории Большой Камень началось с середины прошлого столетия во время строительства завода ДВЗ «Звезда». Во время строительства происходило изменение форм рельефа в прибрежной полосе, сведение растительности, перемещение больших масс грунта, создание искусственных земельных участков. Это привело к тому, что на поверхности в промышленной черте города естественные почвы практически полностью отсутствуют, вместо них преобладает слой техногенных поверхностных образований (ТПО), неоднородных по составу. Для развития крупнейшей судостроительной верфи и обеспечения комфортной инфраструктуры требуются земельные площади. Немаловажно удовлетворительное экологическое состояние вовлекаемых земельных участков. За период с 2015 по 2020 гг. были выполнены исследования экологического состояния, в том числе и радиационные измерения, как в промышленной, так и в жилой зонах городского округа Большой Камень. Радиационно-экологические исследования на земельных участках под строительство зданий и сооружений включали в себя поиск и выявление локальных радиационных аномалий на участках, а также определение радионуклидного состава и удельной активности радионуклидов в пробах почв и грунтов.

Цель исследования – выявить на территории опережающего развития ТОР «Большой Камень» основные аномалии по радиоактивному фону, удельному содержанию ^{137}Cs, ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K в почве как основной вероятный источник облучения людей малыми дозами; дать объективную оценку радиационных рисков и потенциального ущерба здоровью местного населения.

Район, объект и предмет исследования

В орогидрографическом отношении район представляет собой окраинную часть Ливадийского хребта, являющейся в свою очередь юго-западным отрогом горной системы Сихоте-Алинь. В прибрежной части участка изысканий эта возвышенность характеризуется пониженным, сглаженным, но достаточно

сильно расчлененным рельефом, с типично выраженными плавными контурами мягких очертаний положительных и отрицательных форм рельефа. В литологическом отношении на указанной прибрежной территории наиболее характерным является холмисто-увалистый рельеф местности. Этот тип рельефа отличается большой сглаженностью положительных форм: холмов и увалов, абсолютные отметки которых колеблются от 0 до 120 м, чаще 40–80 м, при относительной их высоте 20–40 м. Расчлененность рельефа обуславливается наличием разветвленной гидрографической и овражно-балочной сети, приуроченной к пониженным формам рельефа, склонам холмов и увалам.

В район исследования на территории опережающего развития ТОР «Большой Камень» вошли как участки в зоне размещения промышленного сектора ООО ССК «Звезда» и ОАО ДВЗ «Звезда», так и участки в жилой зоне (рис. 1). Участки в жилой зоне представляют собой частично ненарушенные земельные участки с сохранившимися дубово-белоберезовыми лесами. Рельеф территории завода «ДВЗ «Звезда» техногенно нарушенный. Большая часть площадей подвергалась изменению в процессе развития производств ОАО «ДВЗ «Звезда». К таковым изменениям рельефа относятся отсыпка прибрежной акватории и формирование причальной стенки, причалов, молов и других сооружений, строительство подъездных дорог.

Рис. 1. Район радиоэкологических исследований

В районе исследований почвы представлены маломощными бурыми лесными слабоненасыщенными оподзоленными почвами в лесной зоне и техногенными поверхностными образованиями (ТПО). Бурые лесные слабоненасыщенные оподзоленные почвы на Дальнем Востоке распространены в основном на крутых склонах сопок Приамурья и Приморья и развиваются под травянистыми дубовыми и дубово-сосновыми лесами на маломощном элюво-делювии третичных песков, реже на элюво-делювии осадочных и магматических пород.

В пределах района исследований естественный почвенный покров в промышленной зоне полностью утрачен. Почвы антропогенно нарушенные, верхняя часть почвенного профиля на мощность 1,5–2 м представляет собой техногенные поверхностные образования, а также имеет бетонное или асфальтовое покрытие. Техногенные поверхностные образования (ТПО) в основном состоят из специфического новообразованного субстрата. Они имеют искусственное происхождение и состоят из насыпной толщи искусственного материала (гравий, шлак, остатки скальных пород и т. д.). Местами, на искусственном субстрате начинают образовываться молодые почвоподобные образования с примитивным профилем, малоразвитым, маломощным органогенным горизонтом, присутствием морфологических признаков техногенного химического загрязнения грунтового материала, высокой долей урбоантропогенных включений.

Основными объектами исследования являлись городские почвы. Предметом исследования являлись радиоактивный фон на рассматриваемой территории и удельная активность ^{137}Cs, ^{40}K, ^{232}Th, ^{226}Ra в городских почвах.

Методика исследований

Основными документами, регламентирующими радиационную безопасность, являются: Федеральный закон № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30 марта 1999 г., Федеральный закон № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения», СанПиН 2.6.1. 2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)».

Оценка радиационного состояния исследуемой территории производились согласно СП 11-102-97 «Инженерно-экологические изыскания для строительства» методом маршрутного перемещения с детализацией в контрольных точках.

В составе исследований в ходе оценки радиационной обстановки выполнялись:

- поисковая гамма-съемка;
- измерение мощности эквивалентной дозы внешнего гамма-излучения (МЭД) на контрольных точках;
- радиологическое обследование почв (МУ 2.6.1.2398-08).

Поисковая гамма-съемка на участке проводилась по прямолинейным профилям, расстояние между которыми не превышало 2,5 м. На втором этапе проводились измерения мощности дозы гамма-излучения в контрольных точках. Общее число контрольных точек составляло не менее 10 на 1 га, но не менее пяти точек на земельном участке меньшей площади. Работы проводились с помощью дозиметра-радиометра МКС-АТ6130 № 21256.

В соответствии с МУ 2.6.1.2398-08 отбор проб почвы на радиологическое обследование пробы на

радиологическое обследование отбирались по равномерной сетке из закопух глубиной 0,3 м. Вес пробы составлял 1,5 кг.

Анализ радионуклидного состава отобранного образца на определение эффективной удельной активности техногенных и природных радионуклидов (^{40}К, ^{232}Th, ^{226}Ra, ^{137}Cs) проводился Испытательной лабораторией ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Приморском крае», аттестат аккредитации № RA.RU.21ДВО1 от 18.11.2015 г.

Результаты и обсуждение

Мощность дозы гамма-излучения на открытой местности на территории опережающего развития ТОР «Большой Камень» за период измерений с 2015 по 2020 гг. в среднем составила 0,10 мкЗв/час. Величина естественного радиационного фона варьировала на отдельных участках района исследований от 0,08 до 0,14 мкЗв/час. Максимальные измерения гамма-излучения были получены в промышленной зоне. Таким образом, естественный радиационный фон на территории городского округа Большой Камень не превышает средних многолетних показателей, характерных для Приморского края 0,13 мкЗв/час по данным Роспотребнадзора на апрель 2020 г.

Радиоизотопы ^{232}Th, ^{226}Ra и ^{40}К принадлежат к различным радиоактивным семействам, характеризуются определенными различиями в ландшафтно-геохимических особенностях и являются основными факторами существования естественного радиационного фона. Так, торий присутствует в почвах, главным образом, в форме изоморфных примесей в минералах – в силикатах, в кристаллическую решетку которых данный элемент встраивается легче. Калий, в том числе радиоактивный ^{40}К, также может быть изоморфной примесью и, кроме того, интенсивно сорбируется глинами – гидрослюдами и монтмориллонитом. Для радия, кроме изоморфного замещения, большое значение имеют радиоактивный распад ^{238}U в породах (радий – продукт данного распада) [1, 2, 4].

Удельное содержание ^{40}К в почвах и грунтах, если брать город в целом, изменяется в пределах – от 126 до 576 Бк/кг: в промышленном районе – от 126 до 576 Бк/кг; на территории жилой застройки от 136 до 487 Бк/кг (табл. 1). Средние величины содержания изотопа ^{40}К равны: 335,7 Бк/кг и 300,61 соответственно. Среднее распределение на территории опережающего развития ТОР «Большой Камень» ^{40}К не выходит за пределы среднемировых значений для почвенного покрова (450 Бк/кг) [3].

Абсолютные значения удельной активности ^{226}Ra в верхнем почвенном горизонте города изменяются от 9,1 до 70,3 Бк/кг, при среднем значении 22,4 Бк/кг и от 11,9 до 70,3 Бк/кг в промышленной зоне, при среднем значении 22,67 Бк/кг. Абсолютные значения удельной активности ^{226}Ra в верхнем почвенном горизонте территории жилой застройки изменяются от 9,1 до 48,7 Бк/кг, при среднем значении 19,39 Бк/кг.

Пространственное распределение ^{232}Th в почвах и грунтах в различных районах города варьирует от 10,2 до 38,8 Бк/кг и, что не сильно отличается от распределения его в зоне жилой застройки: 10,5 до 32,8 Бк/кг, при среднем распределении 21,35 Бк/кг. Среднее значение распределения ^{232}Th в промышленной зоне составляет 26,7 Бк/кг, что говорит о чуть более высоком содержании в почвообразованиях промышленной зоны.

Содержание ^{137}Cs в почвах в целом на территории городского округа БК варьирует в пределах – от 0,37 до 13,8 Бк/кг, в среднем 4,6 Бк/кг, в промышленной части города – от 0,66 до 13,8 Бк/кг, при среднем значении 6,05 Бк/кг. На территории расположения жилой застройки содержание ^{137}Cs в почвах изменяется от 0,37 до 2,7 Бк/кг, в среднем 1,7 Бк/кг.

Для установления требований к обеспечению радиационной безопасности населения и работников предприятий, ограничения загрязнения среды обитания людей природными радионуклидами и планирования видов и объема радиационного контроля при обращении с производственными отходами, а также установления радиационно-гигиенических требований по обращению с ними вводится

Таблица 1. Эффективная удельная активность радионуклидов на территории ГО Большой Камень

		Активность, Бк/кг				Эффективная удельная активность, Бк/кг
		^{137}Cs	^{40}K	^{232}Th	^{226}Ra	
Максимальное значение	промышленная зона	13,8	576	38,8	70,3	152
Минимальное значение		0,66	126	10,2	11,9	41,9
Среднее значение		6,05	335,74	26,70	22,67	87,18
Число проб	92	92	92	92	92	92
Максимальное значение	жилая зона	2,7	487	32,8	48,7	121
Минимальное значение		0,37	136,3	10,5	9,1	35,5
Среднее значение		1,17	300,61	21,35	19,39	73,60
Число проб	30	30	30	30	30	30

классификация производственных отходов по эффективной удельной активности природных радионуклидов. Эффективная удельная активность природных радионуклидов считается по формуле:

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3A_{Th} + 0,09A_{K}$$

Эффективная удельная активность в почвах ТОР «Большой Камень» в среднем составила 85 Бк/кг. Для промышленной зоны величина эффективной удельной активности в почвах равна 87,18 Бк/кг, для жилой зоны в бурых лесных почвах 73,6 Бк/кг.

В соответствии с п. 5.3 НРБ-99 грунты на проектируемых промплощадках можно без ограничения использовать в жилищном и промышленном строительстве по фактору радиационной безопасности (планировка территории, отсыпка дорог, площадок), поскольку значение эффективной удельной активности ($A_{эфф}$) природных радионуклидов в данных грунтах менее 370 Бк/кг.

Заключение

Таким образом, выполненные радиоэкологические исследования на территории опережающего развития ТОР «Большой Камень» радиационных аномалий при обследовании участка не выявили. Естественный радиоактивный фон на территории составляет в среднем 0,10 мкЗв/час.

Анализ радионуклидного состава отобранных образцов почв и почвогрунтов на территории опережающего развития ТОР «Большой Камень» не выявил превышения содержания естественных радиоактивных изотопов относительно среднемирового содержания в почвах. Значение эффективной удельной активности ($A_{эфф}$) природных радионуклидов в данных грунтах менее 370 Бк/кг, что позволяет их использовать по фактору радиационной безопасности без ограничения.

Полученные результаты радиационно-экологического обследования района размещения территории опережающего развития ТОР «Большой Камень», показывают ее радиационную безопасность при строительстве зданий и сооружений. Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения на территории участка изысканий, не превышает норм, установленных НРБ-99/2009, ОСПОРБ-99/2010 и СанПиН 2.6.1.2800-10.

Полученные данные по радиоэкологическому состоянию на территории городского округа Большой Камень могут быть использованы в качестве фоновых данных, характеризующих состояние селитебной территории.

Литература

1. Белоусова И. М., Штуккенберг Ю. М. Естественная радиоактивность. – М.: Медгиз, 1961. – 220 с.
2. Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. – М., «Астрея-2000», 1999. – 610 с.
3. Почвоведение : учеб. для ун-тов. Ч. 1. / под ред. В. А. Ковды, Б. Г. Розанова. – М.: Высш. шк., 1988. – 400 с.
4. Старков В. Д., Мигунов В. И. Радиационная экология. – Тюмень: ФГУ ИПП «Тюмень», 2003. – 399 с.

РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (U, Th) В СНЕГОВОМ ПОКРОВЕ В РАЙОНАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ ЗАВОДОВ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Д. А. Володина, А. В. Таловская, Е. Г. Язиков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Томск, Россия, volodina.da2014@yandex.ru

RADIOACTIVE ELEMENTS (U, TH) IN THE SNOW COVER IN THE AREAS OF LOCATION OF CEMENT PLANTS IN THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA

D. A. Volodina, A. V. Talovskaya, E. G. Yazikov

Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, volodina.da2014@yandex.ru

The article deals with the content of radioactive elements (U, Th) in the solid and liquid phases of the snow cover collected from the vicinity of cement production plants. The authors studied the elemental composition of the samples of the solid phase of the snow cover and snowmelt water using inductively coupled plasma mass spectrometry and instrumental neutron activation analysis. Based on the analysis results, the authors calculated such ecological and geochemical indicators as distribution coefficient, balance ratios, and concentration coefficient.

Введение

Предприятия по производству цемента являются одним из источников выбросов пыли в атмосферный воздух. Химический состав пылевых выбросов разнообразен. В работах [8–9] показано наличие в цементной пыли содержание различных микроэлементов, включая уран и торий. Целью данной работы является оценка содержаний радиоактивных элементов в пробах твердой и жидкой фаз снегового покрова, отобранных в районах расположения цементных производств.

Материалы и методы

В 2016 и 2019 гг. на территории Кемеровской (цементный завод 1) и Новосибирской (цементный завод 2) областей был осуществлен отбор проб снегового покрова в окрестностях цементных заводов. Пробы отбирались по векторной системе с учетом главенствующего (южное, юго-западное) направления ветра. Отбор проб производился в зонах влияния цементных заводов, районах расположения карьеров по добыче сырьевых материалов для производства цемента, а также жилых частях исследуемых территорий. Всего было отобрано 15 проб снежного покрова в районе расположения цементного завода 1 и 16 проб – цементного завода 2.

Для отбора проб необходимы полиэтиленовые пакеты (объем 30 литров), пластмассовая лопатка, рулетка, бирки с номерами проб, блокнот и карандаш. Пробы отбирались методом шурфа на всю мощность снегового покрова, кроме пятисантиметрового слоя над почвой для исключения попадания и загрязнения проб литогенной составляющей. С помощью рулетки фиксируется площадь шурфа и глубина. Отбор проб снегового покрова производят в период наибольшего влагозапаса в снеге и записывают время (в сутках) от начала снегостава до дня отбора проб. Вес каждой пробы составляет не менее 15 кг для получения оптимального веса твердой фазы снега для дальнейшего изучения.

Пробоподготовка проб снегового покрова осуществлялась согласно работам [1, 3, 5, 7]. После отбора пробы снегового покрова доставляются в лабораторию и в пластмассовых тарах тают при комнатной температуре в течение суток. Часть отстоявшейся снеготалой воды сливается, оставшаяся часть фильтруется через беззольный фильтр типа «синяя лента», который потом просушивается. Полученная твердая фаза снега просеивается через сито с диаметром ячеек 1 мм для освобождения от посторонних примесей и взвешивается.

Изучение элементного состава проб твердой и жидкой фаз снегового покрова производилось методом масс спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (определение до 68 химических элементов) в ХАЦ «Плазма» и методом инструментального нейтронно-активационного анализа в ядерно-геохимической лаборатории на базе ядерного реактора ТПУ. В качестве фона использовались данные из работы [8] и полученными нами уровни накопления химических элементов в жидкой фазе снега на Обсерватории «Фоновая» ИОА СО РАН.

В соответствии с работой [1] обработка полученных результатов заключалась в расчете коэффициента распределения (Краспред) химических элементов, который определяется как логарифм отношения содержаний химических элементов в составе твердой фазы снежного покрова к жидкой фазе. Для определения баланса между нахождением химических элементов в составе твердой и жидкой фаз снегового покрова были рассчитаны процентные доли содер-

жаний химических элементов в твердой и жидкой фазе проб снегового покрова. Процентная доля содержания химического элемента в твердой фазе снегового покрова определяется отношением произведения массы химического элемента в твердой фазе снегового покрова и 100 к массе химического элемента в составе всей пробы снегового покрова. Процентная доля содержания химического элемента в жидкой фазе снегового покрова определялась как разность между 100 и процентной долей содержания химического элемента, приходящейся на твердую фазу снега. В соответствии с рекомендациями в работах [3, 5] по полученным результатам анализа твердой фазы снегового покрова были рассчитаны $К_с = С/С_ф$, где $К_с$ – коэффициент концентрации; С – содержание элемента в пробе, мг/кг; $С_ф$ – фоновое содержание элемента в твердой фазе снега, мг/кг.

Результаты и их обсуждение

Содержание радиоактивных элементов в пробах твердой и жидкой фаз варьируют в широких пределах (рис. 1). Содержания урана и тория выше в твердой фазе снегового покрова по сравнению с жидкой, что отражается на балансовом соотношение этих элементов в снеговом покрове (рис. 2).

Степень техногенной трансформации окружающей среды можно оценить с помощью расчета Th/U отношения [4]. Расчет отношения содержаний тория к урану показали, что в пробах твердых фаз снегового покрова значения Th/U отношений выше, чем в жидкой и варьируются от 1,6 до 3,1 (табл. 1). В целом, результаты расчета Th/U отношений в твердой фазе снегового покрова соответствуют смешенной природе радиоактивности.

Расчет балансовых соотношений твердой и жидкой фаз радиоактивных элементов показал, что Th содержится преимущественно в твердофазных формах на исследуемых территориях, U в пробах из

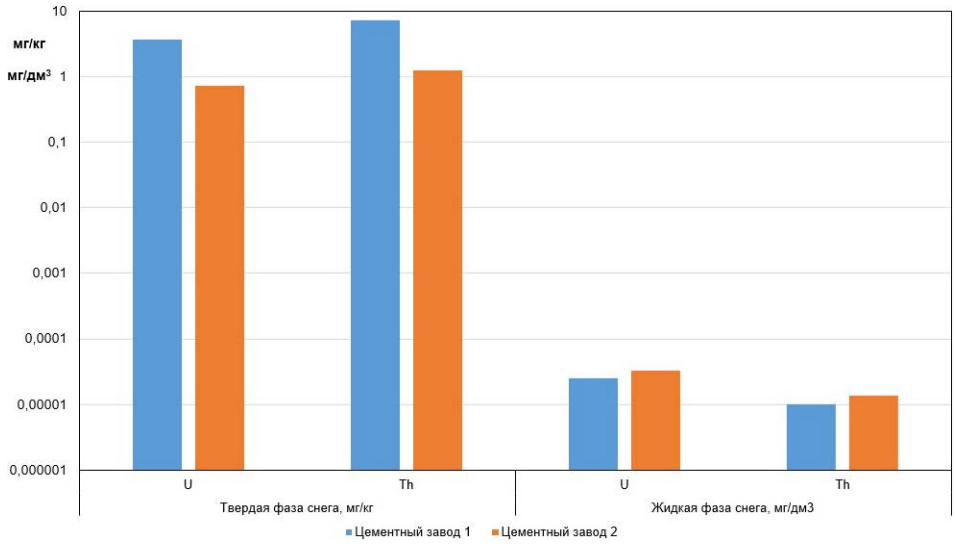


Рис. 1. Средние содержания радиоактивных элементов (U, Th) в пробах твердой (мг/кг) и жидкой (мг/дм^3) фазах снегового покрова из окрестностей цементных заводов

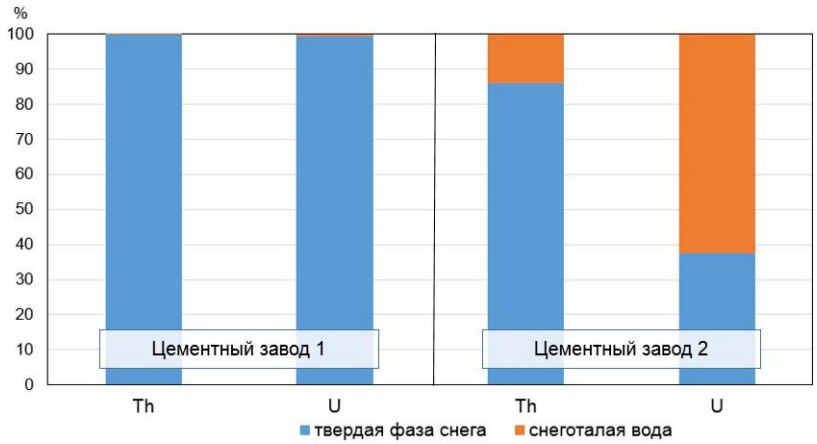


Рис. 2. Балансовые соотношения радиоактивных элементов в пробах снегового покрова из окрестностей цементных заводов, %

окрестностей цементного завода 1 на 99 % содержится в твердой фазе снегового покрова, а содержания U в пробах цементного завода 2 до 60 % приходятся на снеготалую воду и только 40 % – на твердую фазу снегового покрова (рис. 2). Такое распределение химических элементов может быть связано с источниками поступления U в окружающую среду, природными факторами.

Значения коэффициентов распределения химических элементов показывают преобладание рассматриваемого химического элемента в жидкой или твердой фазе снегового покрова. Химические элементы с коэффициентом распределения меньше 0 содержатся преимущественно в жидкой фазе снегового покрова. Коэффициенты распределения со значениями от 0 до 1 формируют группу химических элементов с преобладанием содержаний элементов в твердой фазе в 10 раз выше, чем в жидкой. При преобладании химических элементов в твердой фазе снега над жидкой от 10 до 20 раз значения коэффициентов распределения варьируются от 1 до 2. Химические элементы с содержаниями в 20–30 раз больше в твердой фазе снега, чем в жидкой соответствуют значениям коэффициентов распределения от 2 до 3.

Рассматриваемые радиоактивные элементы ведут себя по-разному. Торий в пробах исследуемых территорий превышает фоновые показатели от 10 до 20 раз и попадает в группу со значениями коэффициентов распределения от 1 до 2. В пробах из окрестностей цементного завода 1 U имеет значение коэффициента распределения в пределах от 2 до 3, что говорит о превышении фоновых содержаний в 20–30 раз, в то время как в пробах из района расположения цементного завода 2 U входит в группу со значениями коэффициента распределения < 0 и преобладает в снеготалой воде (рис. 3).

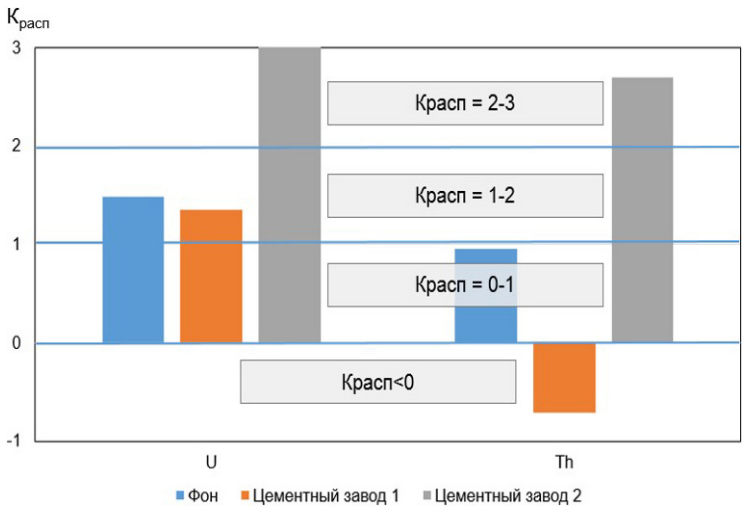


Рис. 3. Коэффициенты распределения радиоактивных элементов в системе «твердая фаза снега – жидкая фаза снега» в пробах снегового покрова из районов расположения цементных заводов (фон* – Обсерватория «Фоновая» ИОА СО РАН)

Таблица 1. Отношения содержаний тория к урану в пробах твердой и жидкой фазах снегового покрова из окрестностей цементных заводов

Район	Цементный завод 1		Цементный завод 2	
	Твердая фаза снега	Жидкая фаза снега	Твердая фаза снега	Жидкая фаза снега
Зона влияния цементного завода	2,2	0,5	1,6	0,6
Жилая зона	3,1	н/д	1,6	н/д
Карьер	2,0	0,04	2,1	0,2
Среднее	2,5	0,4	1,7	0,4

Таблица 2. Коэффициенты концентрации радиоактивных элементов в пробах снегового покрова из окрестностей цементных заводов

Район	Твердая фаза снега		Жидкая фаза снега	
	Цементный завод 1	Цементный завод 2	Цементный завод 1	Цементный завод 2
Зона влияния цементного завода	$U_{6,6} - Th_{0,9}$	$U_{2,3} - Th_{0,6}$	$Th_{2,4} - U_{1,3}$	$Th_{6,1} - U_{2,4}$
Жилая	$U_{17,6} - Th_{2,5}$	$Th_{0,8} - U_{0,6}$	н/д	н/д
Карьер	$U_{0,6} - Th_{0,5}$	$U_{1,1} - Th_{0,5}$	$U_{6,4} - Th_{1,0}$	$U_{8,7} - Th_{5,6}$
Усредненные значения	$U_{9,9} - Th_{0,8}$	$U_{0,7} - Th_{0,6}$	$Th_{4,0} - U_{2,6}$	$Th_{5,5} - U_{3,4}$

Расчет коэффициентов концентрации показал, что радиоактивные элементы находятся в разных содержаниях в пробах твердой и жидкой фаз снегового покрова рассматриваемых территорий (табл. 2). В пробах из района расположения цементного завода 1 содержания U превышают содержания Th по сравнению с содержаниями данных радиоактивных элементов в пробах твердой фазы снегового покрова из окрестностей цементного завода 2. Наибольшие содержания U и Th выявлены в пробах из окрестностей цементного завода 1, отобранных в жилой части рассматриваемой территории. Такое распределение радиоактивных элементов может быть связано с поступлением выбросов в период активного отопительного сезона углем. В пробах из района расположения цементного завода 2 наибольшие значения U и Th найдены в пробах из зоны влияния цементного завода 2. В пробах жидкой фазы снегового покрова наблюдается преобладание содержаний Th над U и превышение фона от 0,4 до 6,4 раз. В тоже время, в районе расположения цементного завода 2 радиоактивные элементы имеют большую подвижность, в результате чего они могут в процессе снеготаяния мигрировать в другие компоненты природной среды.

По данным [8] элементный состав цементной пыли железобетонного завода представлен U (25) и Th (4,3). Результаты инструментального нейтронно-активационного анализа показали, что содержания Th и U в цементе и пыли с пылегазоочистной установки (далее ПГУ) варьируются в пределах от 0,5 до 3 мг/кг, что может указывать на источники их поступления (табл. 3). Кром того, концентрирование радиоактивных элементов в цементной пыли показано в работе [9]. В составе сырьевых компонентов одного из изучаемых заводов нами также определены содержания урана и тория, что что может сказываться на их накоплении в выбрасываемой пыли в результате технологических процессов.

Таблица 3. Содержание радиоактивных элементов в цементе и пыли с ПГУ цементного завода

Материал	U, мг/кг	Th, мг/кг
Цемент	1,4	3,0
Пыль с ПГУ	0,6	2,3

Заключение

Таким образом, в результате анализа было определено содержание радиоактивных элементов (U, Th) в пробах твердой и жидкой фаз снегового покрова. По Th/U отношению радиоактивные элементы имеют смешенную природу. Расчеты коэффициентов распределения ($К_{расп}$) и балансовых соотношений показали, что Th и U исследуемых территорий преобладают преимущественно в твердой фазе над жидкой, за исключением содержаний U в пробах из района расположения цементного завода 2. Коэффициенты концентрации показали, что содержания U в пробах снегового покрова больше, чем содержания Th. Наибольшие содержания U и Th выявлены в пробах из окрестностей цементного завода 1, отобранных в жилой части рассматриваемой территории. Наибольшие уровни концентрации U и Th найдены в пробах из зоны влияния цементного завода 2.

Литература

1. Бортникова С. Б. Методы анализа данных загрязнения снегового покрова в зонах влияния промышленных предприятий (на примере г. Новосибирск) / С. Б. Бортникова, В. Ф. Рапута, А. Ю. Девятова и др. // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2009. – № 6. – С. 515–525.
2. Вартанян М. А. Производство цемента, извести и оксида магния: справочный документ по наилучшим доступным технологиям / М. А. Вартанян, А. И. Захаров, Т. В. Гусева и др., 2009. – 437 с.
3. Касимов Н. С. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы / Н. С. Касимов, Н. В. Кошелева, Д. В. Власов, Е. В. Терская // Вестник Московского ун-та. Сер. 5: «География», 2012. – № 4. – С. 14–24.
4. Рихванов Л. П. Радиоактивные элементы в окружающей среде / Л. П. Рихванов, С. И. Арбузов, Н. В. Барановская и др. // Известия Томского политехнического университета, 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 128–136.
5. Сает Ю. Е. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Сает, Б. А. Ревич, Е. П. Янин и др. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
6. Юркевич Н. В. Химический состав снегового покрова в зоне влияния промышленных предприятий: источники загрязнения и формы переноса элементов / Н. В. Юркевич, О. П. Саева, Е. П. Бессонова, С. Б. Бортникова, Н. А. Абросимова, А. Ю. Девятова // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ, 2014. – Т.2. – № 3. – С. 169–174.
7. Язиков Е. Г. Разработка методологии комплексной эколого-геохимической оценки состояния природной среды (на примере объектов юга Западной Сибири) / Е. Г. Язиков // Известия Томского политехнического университета, 2011. – Т. 304. – Вып. 1. – С. 325–336.
8. Язиков Е. Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: дис. … д-ра. геол.-мин. наук. – Томск, 2006. – 423 с.
9. Язиков Е. Г. Радиоактивные элементы в атмосферных выпадениях снегового покрова урбанизированных территорий / Е. Г. Язиков, А. В. Таловская, Е. А. Филимоненко, В. В. Литау,

Т. Е. Адильбаева, Т. С. Шахова / Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Материалы V Международной конференции, г. Томск, 13–16 сентября 2016 г. – Томск: STT, 2016. – С. 747–751.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАСОМАТИТОВ ВУЛКАНА КУДРЯВЫЙ (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА) В РАДИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Т. В. Володькова

Институт Тектоники и Геофизики имени Ю.А. Косыгина
Хабаровск, Россия, tat-volodkova@yandex.ru

THE CHARACTERISTICS OF THE METASOMATITES OF KUDRYAVY VOLCANO (KURIL ISLANDS) IN THE RADIOGEOCHEMICAL FIELDS

T. V. Volod'kova

Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics
Khabarovsk, Russia, tat-volodkova@yandex.ru

The maps of magnetic field and fields of the natural radioactive elements (NRE) ratios compiled using data of aerogeophysical survey on a scale of 1 : 50000, allow us to refine the geological structure of active volcanoes and to reveal the areas of metasomatism. As an example, the materials obtained on the Medvezhya caldera (Iturup Island) are used. The inferred materials are evidence of metasomatic nature of the distinguished areas and support their concentric-ring structure. The data obtained are insufficient to reliably determine the type of metasomatism.

В работе [3] графоаналитическим методом впервые получено решение дифференциальных уравнений, описывающих процессы регионального инфильтрационного метасоматоза. В Дальневосточном регионе подобные процессы описывают гидротермально-метасоматические системы рудных узлов и полей, диаметром порядка 10–20 км, связанные с относительно небольшими магматическими телами. Графическое решение уравнений инфильтрационного метасоматоза с точностью доверительного интервала дано на рис.1; оно подтверждено экспериментальными данными.

Доверительный интервал составляет (2–3) Δ, где Δ – среднеквадратическая погрешность, поэтому графоаналитическое решение уравнений не обладает высокой точностью, но является весьма вероятным. Вероятно, оси эллипсов, их наклон, эталонные характеристики различных типов метасоматитов (рис. 1), могут существенно варьировать. Для проверки этого, попробуем привлечь характеристики метасоматитов генетически аномальных регионов (Курил), а также экспериментальные данные с действующих вулканов, где большую роль играет газовая составляющая (активность фумарол). В статье [2] описывались тренды характеристик отношений ЕРЭ вулканитов и магматических комплексов Курил; на форму этих трендов влиял тип щелочности вулканитов, а также интенсивность газовой активности. Могут ли в принципе использоваться данные рис. 1 и табл. 1 для описания процессов метасоматоза на активных вулканах?

Рассмотрим это на примере кальдеры Медвежьей (остров Итуруп), внутри которой находится один из активных Курильских вулканов Кудрявый. При картировании гидротермально-метасоматически измененных пород по характеристикам отношений ЕРЭ, большое значение имеет определение точных значений фона. На континенте такие построения не представляют труда. В ареале действующих вулканов нарушается правило постоянства отношений, так как формирование комплексов происходит под воздействием разноглубинных открытых магматических очагов [2]. Действующие вулканы Курил, в т. ч. кальдера Медвежья, относятся к Везувианскому типу; здесь выделяются остатки двух древних сомм, формирующих гребень кальдеры, центральный стратовулкан с кратером и группа из нескольких конусов вулканов. Вулкан Кудрявый представляет собой основной, крупнейший стратовулкан в центре кальдеры Медвежьей. Считается, что вулканы Везувианского типа формируются как минимум в два этапа. В течение первого цикла извергаются вулканиты различной основности, близкие по типу щелочности; по характеристикам отношений ЕРЭ они образуют четкий тренд. В конце цикла формируется кальдера и гидротермально-метасоматическая система вулкана; инфильтрационные региональные метасоматиты могут отмечаться в пределах всей кальдеры. Стратовулкан формируется в начале следующего цикла, под влиянием активных глубинных магматических очагов и процессов дегазации. В течение второго цикла старая гидротермально-метасоматическая система

может быть переработана и разрушена, а новая не успевает сформироваться. Последующие этапы по отношению к предыдущим часто отличаются по типу щелочности; за счет продувки глубинными газами активных магматических очагов развиваются явления «магнетитовой отсадки». Рудная перспективность такой системы зависит в первую очередь, от степени развития регионального метасоматоза [2, 3]. Так как значения отношений ЕРЭ разных комплексов постоянно варьируют, выбор фона сложен.

Сложный кальдерный вулкан Медвежий, по определению Г. С. Горшкова [4], обладает многими из вышеупомянутых особенностей. Здесь выделяются остатки двух сомм, в т. ч. гребень кальдеры диаметром до 8–9 км, внешний склон которой представлен древнейшими доледниковыми образованиями. В эродированной внутренней части кальдеры выделяются потоки лав и другие относительно молодые комплексы. Дно кальдеры заполнено лавами почти полностью, их состав, преимущественно, андезито-базальтовый и базальтовый [4, 5]. Все базальтоиды кальдеры Медвежьей имеют пониженную либо нормальную щелочность [1, 4, 5, 6]. Стратовулкан Кудрявый и конусы более мелких вторичных вулканов образуют хребет субширотного простирания (очевидно, цепь вулканических конусов связана с разломом). В настоящее время фумаролы широко распространены на вулкане Кудрявый, есть признаки активности в недавнее время и других конусов субширотного хребта [1, 4, 5, 6]. На оси Субширотного хребта и южнее его выделяется несколько эффузивных и экструзивных конусов, в т. ч. дацитов [4, 5]. В кратере вулкана Кудрявый находится уникальное месторождение рения с возобновляемыми ресурсами [1, 7]. С учетом данных С. Н. Рычагова [6], при формировании гидротермально-метасоматической системы кальдерного вулкана, можно выделить как минимум, два этапа. Приповерхностная гидротермальная система формируется на экстремальном этапе развития под воздействием метеорных вод; с ней связан инфильтрационный региональный метасоматоз. На регрессивном этапе развития, в зонах глубоких трещин, проявлен мантийный (?) высокотемпературный метасоматоз. Оба эти этапа в кальдере Медвежьей хорошо отличаются по температуре [1]: для регионального метасоматоза типична температура порядка 100–300 градусов, зоны выхода мантийных струй на поверхность имеют температуру от 900 градусов и выше. Для низкотемпературного метасоматоза типичны аргиллизация, окварцевание [5, 6], высокотемпературный метасоматоз представлен альбититами, пироксенитами вплоть до оливинитов [1].

Особеннсти строения кальдеры Медвежьей хорошо видны на картах физических полей, полученных на основе аэрогеофизической съемки масштаба 1 : 50000 (рис. 2). Древние образования соммы и вмещающих комплексов четко выражены слабодифференцированным отрицательным магнитным полем значениями (–2,5–7,5) • 10^2 нТл. Послеледниковые базальтоиды, почти полностью залившие дно кальдеры, картируются дифференцированным магнитным полем интенсивностью (–7,5 – +10.0) • 10^2

Таблица 1. Эталонные характеристики типов метасоматитов Приамурья [3]

№ п/П.	Типы метасоматоза	Значения отношений ЕРЭ C_{eij}			Параметры метасоматоза	
		U/Th	K/Th, 10^{-4}	U/K, 10^4	Водородный показатель pH_s	Температура, T_s град
1	Аргиллизиты	9,1	–0,5	15,6	4,1	253
2	Вторичные кварциты	0,2	–2,3	10,6	3,9	365
3	Кварц-турмалиновые	–0,2	–2,3	9,7	4,0	392
4	Пропилиты	4,8	10,1	–4,0	8,1	278
5	Пропилитоиды кварц-серицитовые, турмалин-хлоритовые	–1,0	7,3	–7,4	5,1	387
6	Оливинитовые, диопсидированные	0,8	10,7	31,2	8,5	1010
7	Полевошпат-пироксеновые	0,2	–2,0	–6,6	8,1	883
8	Титаномагнетит-биотитовые	–1,9	–0,7	7,6	7,7	1233
9	Кварц-адуляровые, кварц-полевошпатовые	–0,2	10,4	–6,8	4,5	422
10	Кварц-силикатные (биотититы ?)	3,7	–0,1	5,6	3,7	277
11	Кварц-серицитовые (филлизиты ?)	1,8	–0,1	1,8	4,0	253

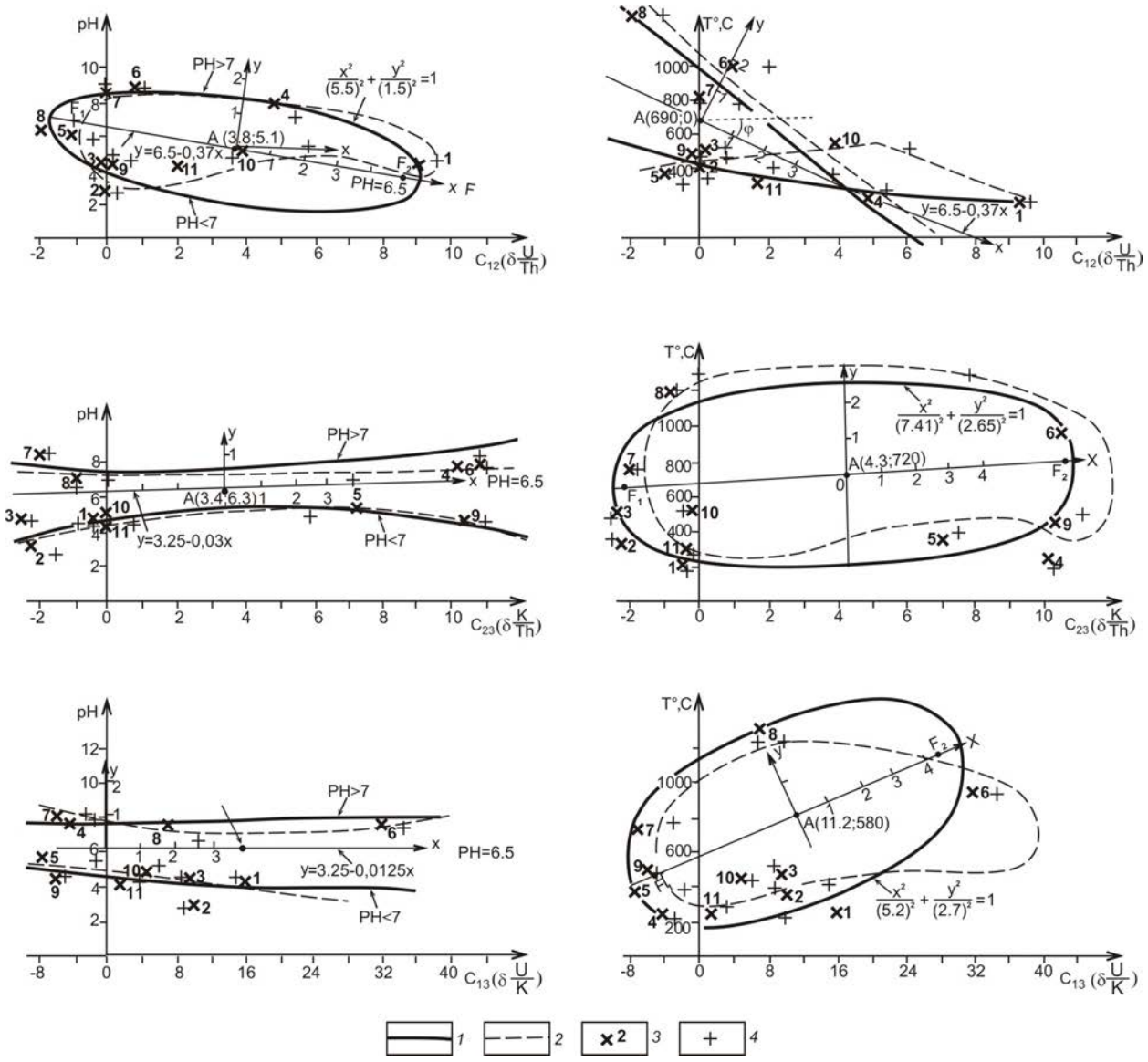


Рис. 1. Графики распределения надфоновых аномалий естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ), нормированных: 1 – по фону структурно-формационных зон (СФЗ), 2 – по гранитно-метаморфическому слою. 3, 4 – соответствующие фигуративные точки типов метасоматоза

нТл. Все конусы вулканов выделяются локальными магнитными аномалиями до $10 \cdot 10^2$ нТл и выше, что позволяет предположить наличие в глубинных камерах под вулканами явлений «магнетитовой отсадки». Вулканические конусы субширотного хребта и купола хорошо выражены на картах отношений ЕРЭ, особенно на карте уран-калиевых отношений. Экструзивные и эффузивные купола в западной части Субширотного хребта (купол Меньшой Брат и др), а также в южной части кальдеры Медвежьей [4], выражены небольшими локальными аномалиями магнитного поля интенсивностью $(2,5–7,5) \cdot 10^2$ нТл. Они выражены на картах уран-калиевых и уран-ториевых отношений. Таким образом, основные элементы геологического строения кальдеры Медвежьей легко картируются (рис. 2).

Интенсивные крупные аномалии отношений ЕРЭ, истолковываются как зоны регионального метасоматоза.

1. Протяженная зона в центре кальдеры явно связана с осью Субширотного хребта; вероятна ее связь с глубинным метасоматозом в зоне разлома. Эта зона выражена пониженным калий-ториевым отношением (K/Th < 0,2) и аномалиями уран-калиевого отношения до U/K = 3,17.

2. В южной части кальдеры, в ареале развития экструзивных куполов, выделена связанная с ними зона аномального уран-ториевого поля (U/Th до 0,95), а также аномальное повышение U/K до 1,75–2,0.

3. Вокруг связанного с Субширотным хребтом ареала глубинного (?) метасоматоза выделяется несколько аномалий с повышенным калий-ториевым

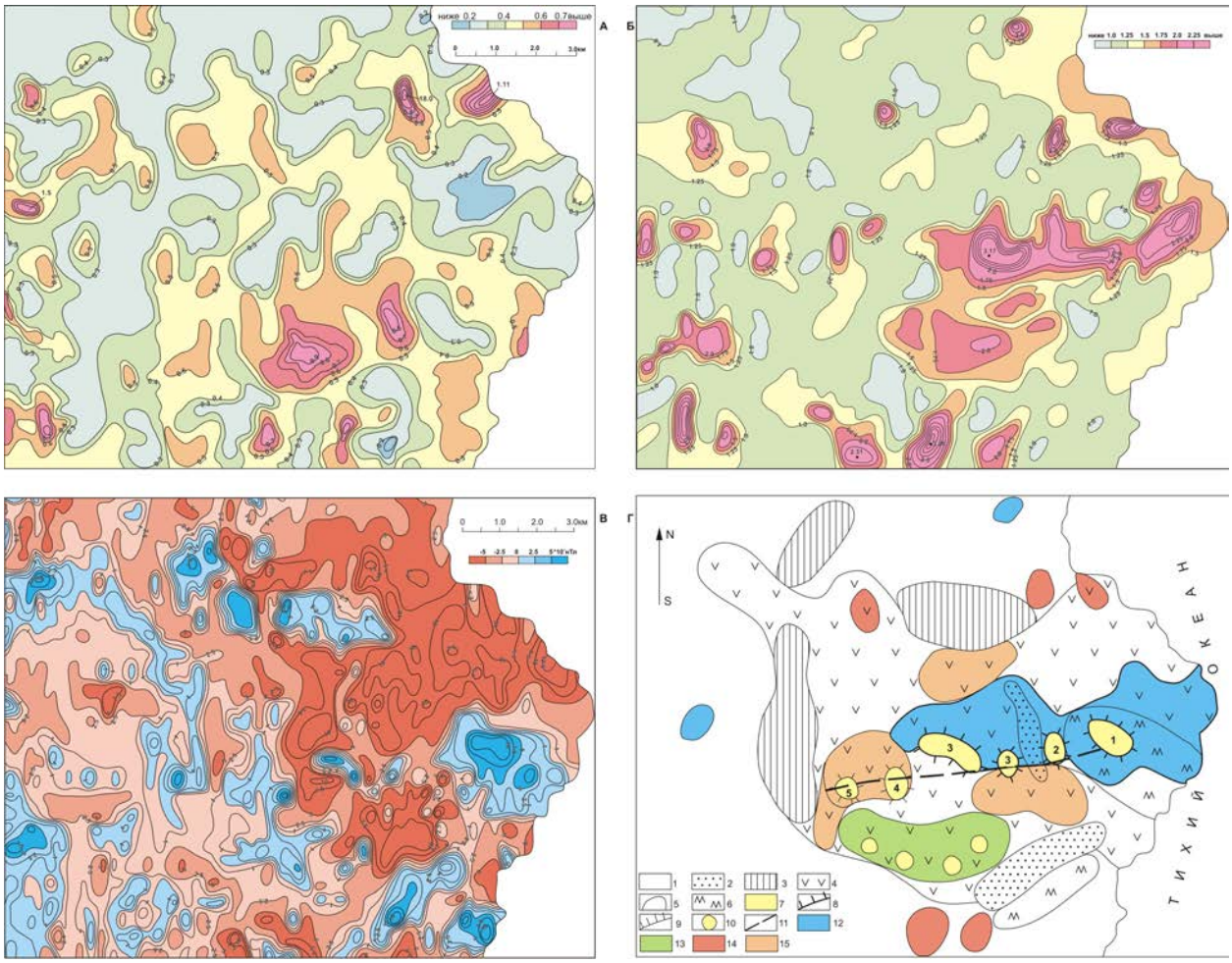


Рис. 2. Геолого-геофизические материалы по кальдере Медвежьей

А, Б – карты отношений радиоактивных элементов: А – уран-ториевых, Б – уран-калиевых. В – карта магнитного поля. Г – схема интерпретации: 1 – древние вулканические комплексы, 2 – остатки древней соммы, 3 – остатки соммы кальдеры Медвежьей, 4 – молодые вулканиты (андезито-базальты), 5 – контур магматических тел, 6 – ареалы «магнетитовой отсадки», 7 – центральные структуры, в т. ч.: 8 – конусы и жерла вулканов (1 – Медвежий, 2 – Средний, 3 – Кудрявый), 9 – купола экструзивные и эффузивные (4 – Меньшой Брат), 10 – купола и экструзии (дациты?), 11 – ось Срединного разлома, 12 – высоко-среднетемпературные метасоматиты, 13 – ареал среднетемпературного метасоматоза, 14 – низкотемпературный метасоматоз, 15 – средне-низкотемпературный метасоматоз.

отношением (U/Th до 0,6–0,65 и слабоповышенным уран-калиевым отношением Они интерпретируются как метасоматиты с относительно невысокой температурой образования.

4. На периферии кальдеры Медвежьей выделены небольшие ореолы низкотемпературных (?) метасоматитов с высокими значениями уран-ториевых аномалий (U/Th до 1,15) и уран-калиевых аномалий до 2,48.

Перечисленные выше типы аномалий отличаются даже концентрической зональностью, типичной для приповерхностных гидротермально-метасоматических систем. Попробуем определить тип метасоматитов с помощью табл. 1, для чего необходимы характеристики фона. Фон можно определить тремя способами:

1. Согласно правилу постоянства отношений, для расчета фона берем значения отношений ЕРЭ базальтоидов пониженной щелочности Курил [2]: U/Th = 0,95; K/Th = 1,80; U/K = 0,58. Сразу видно, что эти данные не подходят.

2. Характеристики метасоматитов считаются по отношению к параметрам отношений ЕРЭ древней соммы: U/Th = 0,25; K/Th = 0,30; U/K = 1,15.

3. При расчете фона учитываются значений отношений ЕРЭ молодых вулканитов внутри кальдеры Медвежьей: U/Th = 0,45; K/Th = 0,35; U/K = 1,35.

Формулы расчета значений надфоновых отношений и принципы определения типов метасоматоза автором приведены в работе [3].

Из анализа табл.2 следуют выводы:

1. Для расчетов значений фона отношений ЕРЭ геологических комплексов активного вулкана допустимо использование характеристик вмещающих не-

Таблица 2. Надфоновые отношения ЕРЭ метасоматитов кальдеры Медвежьей

По отношению к характеристикам соммы						
№	U/Th	K/Th	U/K	ΔU/Th	ΔK/Th	ΔU/K
1	0,2	0,15	3,17	–0,5	–1,5	8,0
2	0,95	0,45	2,2	7,0	1,5	4,2
3	0,65	0,55	1,0	4,0	2,5	–0,6
4	1,15	0,4	2,78	9,0	1,0	6,5
По отношению к молодым вулканитам кальдеры						
1	0,2	0,15	3,17	–2,5	–2,0	7,3
2	0,95	0,45	2,2	5,0	1,0	3,4
3	0,65	0,55	1,0	2,0	2,0	1,4
4	1,15	0,4	2,78	7,0	–0,5	5,7

измененных пород (по имеющимся данным трудно установить, какой из вмещающих комплексов предпочтителен).

2. Надфоновые характеристики отношений ЕРЭ гидротермально-метасоматических комплексов кальдеры Медвежьей, с учетом данных о температурах образования [1], с точностью доверительного интервала, описываются графическим решением уравнения метасоматоза (рис. 1), что является доказательством их метасоматической природы.

3. Данные табл. 1 определяют случайно выбранные типы метасоматоза и не обладают полнотой (описаны не все возможные типы метасоматоза); реально каждый тип в табл. 1 отражается на условном эллипсе не фигуративной точкой, а сегментом.

4. Типы метасоматоза кальдеры Медвежьей не соответствуют полностью никаким метасоматитам в таблице 1; охарактеризовать их без дополнительных данных невозможно.

5. Все выделенные ареалы метасоматитов отражают явления регионального инфильтрационного метасоматоза. С учетом данных Р. Е. Бочарникова [1], они относятся к классу средне-низкотемпературных метасоматитов (наподобие кварц-силикатных, аргиллизитов); высокотемпературный мантийный метасоматоз на большой площади маловероятен.

6. Можно предположить, что метасоматиты центральной субширотной зоны кальдеры Медвежьей имеют относительно повышенные температуры образования, а на периферии кальдеры сосредоточены низкотемпературные метасоматиты.

Литература

1. Бочарников Р. Е. Физико-химические аспекты магматической дегазации на вулкане Кудрявый, Курильские острова. Автореф дисс. канд.геол.-мин.н. – М., 2002. – 20 с.
2. Володькова Т. В. Особенности магматизма острова Кунашир (Курильская островная дуга) по аэрогеофизическим данным // Тихоокеанская Геология, 2007. – Т. 26. – № 6. – С. 15–36.
3. Володькова Т. В. Температура, водородный показатель и аномалии отношений радиоактивных элементов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2020. – № 4. – Выпуск № 48. – С. 85–100.
4. Горшков Г. С. Вулканизм Курильской островной дуги. – М.: Наука, 1967. – 267 с.
5. Курильские острова (природа, геология, землетрясения, вулканы, история, экономика) / под ред. Злобина Т. К., Высокова М. С. – Южно-Сахалинск, Сахалинское книжное изд-во, 2004. – 228 с.
6. Рычагов С. Н. Эволюция гидротермально-магматических систем островных дуг. Автореф дисс. д.геол.-мин. н. – М., 2003. – 50 с.
7. Чаплыгин И. В. Рудная минерализация высокотемпературных фумарол вулкана Кудрявый: о. Итуруп, Курильские о-ва. Автореф. дисс. канд. геол.-мин.н. – М., 2009. – 26 с.

УРАН В ДИКТИОНЕМОВЫХ СЛАНЦАХ ПРИБАЛТИЙСКОГО БАССЕЙНА (ЛЕНИНГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ)

В. И. Вялов[1], Т. А. Дю[2]

[1]ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского»
отдел геологии горючих полезных ископаемых
МГУ имени М. В. Ломоносова
кафедра геологии и геохимии горючих полезных ископаемых
ЮФУ
кафедра месторождений полезных ископаемых
vladimir_vyalov@vsegei.ru
[2]ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»
кафедра месторождений полезных ископаемых
Ростов-на-Дону, Россия, dyu.timur94@gmail.com

URANIUM IN THE DICTYONEMA SHALE OF THE BALTIC BASIN (LENINGRAD REGION)

V. I. Vyalov[1], T. A. Dyu[2]

[1]A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute
St. Petersburg, Russia, vladimir_vyalov@vsegei.ru
[2]Southern Federal University
Rostov-on-Don, Russia, dyu.timur94@gmail.com

Data is presented on the uranium content of Dictyonema shale in the Baltic basin (Leningrad region). Are investigated structure and composition of matter the Dictyonema shale of the Baltic basin. In them the raised maintenances of uranium reaching of is minimum-industrial level are defined. Correlation of uranium with other rare elements are defined. The Dictyonema shale can be considered as genetic type of uranium ores.

Актуальность исследований. Как сырье на уран диктионемовые сланцы раннеордовикского возраста, широко распространенные в Прибалтийском бассейне в Ленинградской области, рассматриваются уже более полувека. Начиная с середины 1940-х гг. неоднократно организовывались поисковые работы, направленные на выяснение перспектив их урановосности. С 1960-х годов в Прибалтийском бассейне проводились повторные ревизионно-поисковые исследования на уран с целью разведки крупных запасов с содержанием урана не ниже 0,05 %. В результате работ было оконтурено 5 участков в ранге месторождений непромышленных руд с запасами урана (тыс. т): Котловское – 6,2; Ранноловское – 2; Кайболовское – 5,7; Куммоловское – 57,96; Красносельское – 13,07. Эти месторождения расположены в западной части Ленинградской области между пос. Куммолово, Копорье – Красное Село [2]. Были выявлены значительные ресурсы урановых руд, но ввиду невысоких содержаний (в среднем 0,016 %) и сложности технологий обогащения данные руды признали нерентабельными и работы на уран прекратили. Помимо урана в сланцах были обнаружены относительно высокие содержания никеля, ванадия и молибдена, что спровоцировало последующие исследования ДС на комплексное полиметальное сырье.

Однако в последние годы, в связи с сокращением традиционных источников урана и увеличивающемся его спросе не только в энергетической, но и военной, медицинской и других отраслях промышленности, вновь становится актуальным изучение нетрадиционных комплексных объектов урана с небольшими содержаниями, но большими геологическими ресурсами.

С 2009 г. Отделом геологии горючих полезных ископаемых ВСЕГЕИ проводятся исследования ДС на уран и другие элементы. На основе новых методов, таких как масс-спектрометрия, подтверждается высокая концентрация урана, на уровне забалансовых и промышленных руд. Также, впервые устанавливаются промышленные концентрации ряда редких и рассеянных элементов: Re, Rb, Cs, Sc, REE и др. В 2012–2014 гг. в Ленинградской области, в районе Кайболово-Гостилицы под руководством В. И. Вялова (ВСЕГЕИ) производились поисковые работы на рений, которые сопровождались массовым отбором проб ДС и их последующим аналитическим исследованием на рудные элементы, включая уран. Была создана новая геолого-геохимическая база по ДС, которая послужила основой для написания данной работы.

Цель исследований: изучить особенности уранового оруденения в диктионемовых сланцах Прибалтийского бассейна на территории Ленинградской области, с детализацией исследований в пределах Кайболово-Гостилицкой площади.

Прибалтийский сланцевый бассейн локализируется в юго-западном и южном обрамлении Балтийского кристаллического щита. Бассейн входит в состав венд-палеозойского платформенного чехла и является частью Прибалтийской и Ладожской моноклиналей Русской плиты.

Диктионемовые сланцы (ДС) Прибалтийского бассейна представляют собой тонкослоистые аргиллиты, содержащие 10–15 % органики (керогена). Название получили ввиду наличия в них остатков граптолитов *Dictyonema flabelliformis*, распространенных в составе планктона раннепалеозойских морей. В Ленинградской области такие сланцы обладают огромными ресурсами в десятки миллиардов тонн и рассматриваются в качестве низкосортного энергетического топлива (теплота сгорания около 1000 ккал/кг, выход смолы около 3 %), а также являются потенциальным сырьем для получения урана [4].

Методика исследований. Комплексно проанализирована и переинтерпретирована фондовая и опубликованная геолого-геохимическая информация об уране ДС Прибалтийского бассейна. Выполнены геолого-минералогические, геохимические, а также математические исследования.

Структура и вещественно-петрографический состав ДС изучены на растровом электронном микроскопе VEGA II LMU (фирмы «Tescan») с энергодисперсионным микроанализом INCA ENERGY 450/XT (фирмы «OXFORD Instruments Analytical») в Центре исследований минерального сырья и состояния окружающей среды Южного федерального университета.

Аналитические определения концентраций урана (и ряда других микроэлементов) проводились в ЦЛ ФГБУ ВСЕГЕИ методами масс-спектрометрии ISP MS с кислотным растворением пробы сланцев и предварительным озолением, чтобы избежать потерь химических элементов. Всего было выполнено 672 анализа.

Содержание основных петрогенных оксидов в сланцах определялось с помощью рентгено-флуоресцентного спектрального анализа (РФСА). Было проанализировано 90 проб ДС.

Обработка полученной аналитической информации производилась при помощи корреляционного анализа (ранговой корреляции) между содержаниями элементов. Визуализация геохимических ассоциаций элементов-примесей на основе анализа корреляционной матрицы выполнена с помощью программы BioLayout Express3D.

Результаты исследований. В петрографическом отношении ДС состоят из минеральной части (85–90 %) и из органического вещества (ОВ) граптолитов и низших водорослей (до 15 %).

Органическая составляющая черного сланца является его важной составной частью, которая определят цвет породы и ее сорбционные свойства. По результатам петрографического анализа установлено, что органическое вещество сланцев представлено как остатками граптолитов, так и низших водорослей. Основная масса сложена витринитом и коллальгинитом сине-зеленых водорослей (от светло-желтого до буроватого цвета) в дисперсной смеси с глинистым веществом. Остатки граптолитов представлены зоохитинитом в виде вытянутых обрывков скелета, отчетливо выделяющихся своим цветом (от темно-бурого до черного) (рис. 1).

Минеральная часть сланца представлена кварцем (иногда до 60 %), разной степенью окатанности зерен, калиевыми полевыми шпатами (санидин) и включениями кислых сульфидов (пирит, марказит, сфалерит) (рис. 2), а также карбонатными (рис. 3) и фосфатными конкрециями.

Сульфидная минерализация свидетельствует о восстановительной, богатой органикой среде. Большое количество органики в осадке позволяют развиваться бактериям, которые восстанавливают сульфаты морской воды и выделяют сероводород, реагирующий с железом, что, в конечном итоге, ве-

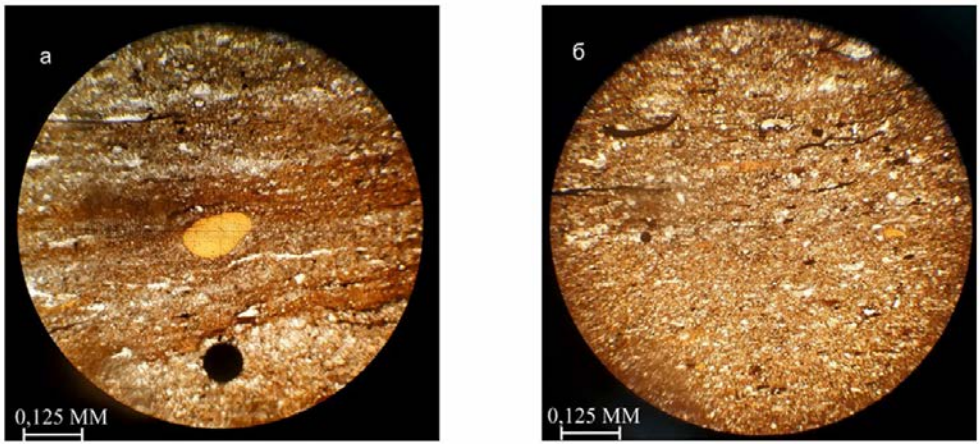


Рис. 1. Образец ДС в проходящем свете

а – псевдовитринит в веществе сланца, б – остатки граптолита *Dictyonema flabelliformis*

дет к образованию пирита. Стоит сказать, что восстановительная сероводородная среда благоприятна для аккумуляции из придонных вод ряда ценных металлов, таких как V, Mo, U, Re, REE и др.

В составе ДС иногда фиксируется эпизодическое наличие минерала редких земель - монацита (рис. 4) и апатита (рис. 5). Известно, что уран присутствует в этих минералах в виде примесей.

По данным РФСА (табл. 1) преобладающим оксидом является кремнезем, являющийся основой, входящих в состав ДС кварца и силикатных минералов.

Большое значение глинозем имеет в глинистых минералах, а также в обнаруженном в ДС при помощи электронной микроскопии с микроанализом высокотемпературном калиевом полевом шпате – санидине. Отметим большой процент потерь при прокаливании, что связано с наличием карбонатов в составе сланцев, в частности, в виде конкреций.

Породообразующие оксиды в ДС исследовались также с целью выявления корреляционных связей с ураном. Известно, что значения некоторых макроэлементов могут указывать на условия накопления урана и сопутствующих ему металлов.

По результатам корреляционного анализа (выборка из 90 проб) уран взаимосвязан с макроэлементами — с Al (коэффициент корреляции 0,57), K (0,52), Na (0,37), Mg (0,59), Fe (0,45). Видимо, уран сорбирован и на глинистых минералах.

Содержание урана имеет отрицательную корреляцию с Si (–0,61). Видимо, увеличение кремнезема в составе ДС ведет к уменьшению количества ОВ – основного концентратора урана. Известно, что все виды организмов имеют свойство накапливать растворенный в воде уран, при этом повышая его концентрацию по отношению к водной среде в десятки и сотни раз. Сорбционная роль органики проявлялась как в результате прижизненного накопления металла (и многих других микроэлементов) граптолитами и сине-зелеными водорослями, так и последующей сорбции урана (и многих других металлов) отмершим ОВ в донных осадках [5]. Соответственно, уменьшение количества ОВ приводит к снижению концентрации урана. Корреляция содержания урана с Ca отрицательна (–0,28), а также с Mn (–0,34) и P (–0,3). Следовательно, щелочные условия среды вряд ли способствовали осаждению урана.

Т. е., как силикатное, так и фосфатное вещество ДС, видимо, не может содержать уран в значительном количестве.

По результатам масс-спектрометрии содержание урана в ДС может достигать минимально-промышленного уровня (300 г/т и более). Подобный уровень могут иметь и концентрации некоторых других редких и рассеянных элементов.

Усредненные геолого-геохимические данные по металлоносности диктионемовых сланцев Прибалтийского бассейна представлены в табл. 2.

Уран в пласте ДС распределен неравномерно в широком диапазоне концентраций (от 7 до 829 г/т), что указывает и на его перераспределение в эпигенезе. Установлено, что концентрация урана и некоторых других промышленно ценных металлов имеют обратную зависимость от мощности пласта сланцев. Чем меньше мощность пласта ДС, тем выше концентрации этих элементов.

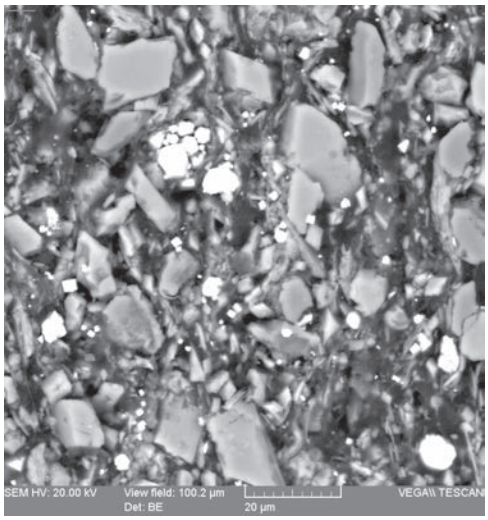


Рис. 2. Кварц, КПШ и пирит в веществе ДС (черное – ОВ)

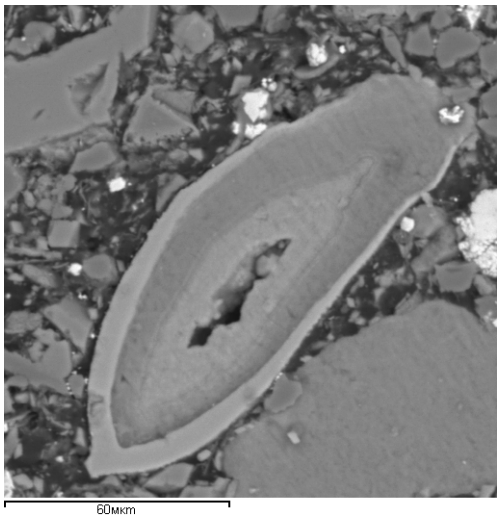


Рис. 3. Конкреция карбонатов

Таблица 1. Содержание в ДС основных петрогенных оксидов в %

SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	ппп
58,3	0,55	8,41	5,89	0,03	0,99	2,3	0,11	5,03	0,42	18,1

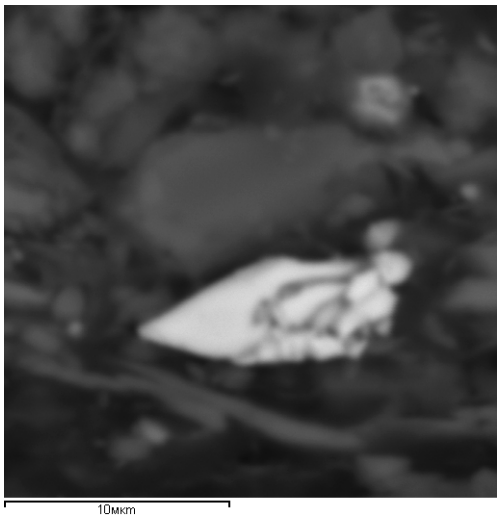


Рис. 4. Зерно монацита

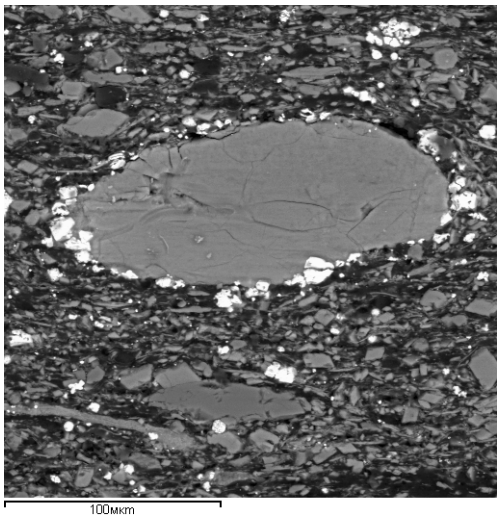


Рис. 5. Апатит, инкрустированный пиритом

По результатам ранговой корреляции (рис. 6), уран интенсивно коррелирует с целым рядом металлов (r): с цветными — V (0,78), Mo (0,55), Cr (0,51), Sb (0,5), Cu (0,4), Ni (0,3); редкими и рассеянными — Sc (0,6), Ga (0,7), Rb (0,78), Cs (0,69), Re (0,2), благородными – Ag (0,6).

Это может быть обусловлено общностью их источника поступления в осадок — морской воды, в которой растворены многие элементы. Еще М. Н. Альтгаузен [1] высказал мнение, что источником урана в ДС является морская вода, в которую он попадал из области сноса.

Уран и других ценные металлы накапливались в осадках будущих ДС в раннеордовикское время в условиях заливо-проливообразного мелководного морского бассейна с нормальной соленостью. В области сноса преобладали кислые магматические образования Балтийского щита – источники урана и многих других металлов [3]. И, как уже было отмечено выше, большое количество органического материала и существовавшие в то время восстановительные сероводородные обстановки создали благоприятные условия для сорбции урана из придонных вод.

Зная такие параметры, как: среднее содержание урана в пласте ДС – 166 г/т, среднюю мощность пласта ДС – 3,44 м (по данным поисковых работ 2012–2014 гг.), удельный вес ДС – 2,403 г/см^3, а также площадь исследованной территории – 593,4 км^2 – можно оценить прогнозные ресурсы урана в преде-

Таблица 2. Микроэлементный состав ДС по результатам масс-спектрометрии в г/т (n = 672)

Элемент	x_{CP} ± σ		min…max		Элемент	x_{CP} ± σ		min…max	
Li	15,35	4,93	3,00	34,20	**Rb**	**79,32**	21,63	9,00	127,00
Sc	**8,00**	2,53	0,34	28,30	Sr	70,59	31,45	38,60	414,00
Co	12,29	5,83	1,10	56,90	Zr	115,86	83,46	32,00	366,00
Ni	128,54	62,19	6,00	512,00	Nb	10,55	2,62	0,33	16,50
Cu	68,59	50,25	12,00	263,00	**Mo**	**153,00**	108,02	1,70	562,00
Zn	697,36	1560,76	5,00	12900,00	Sb	1,99	1,14	0,20	17,10
Ge	**1,72**	1,27	0,70	19,20	**Cs**	**3,34**	1,17	0,02	7,40
Ag	1,45	0,68	0,00	6,80	Ba	336,80	84,73	91,50	812,00
Sb	6,56	3,47	0,10	23,50	Ta	0,84	0,22	0,02	1,60
Te	0,33	0,29	0,00	1,53	W	12,22	66,38	0,50	1400,00
Re	**0,11**	0,10	0,01	1,29	Th	10,68	2,40	3,00	17,70
Be	1,82	0,80	0,12	7,30	**U**	**166,31**	63,00	7,00	829,00
V	**718,80**	356,51	14,00	1600,00	**ΣРЗЭ + Y**	**265,07**	59,88	95,00	724,29
Cr	49,64	18,29	14,20	137,00	МПГ	0,02	0,02	0,00	0,14
Ga	**11,62**	3,37	1,50	20,40	**TiO_2, %**	**0,55**	0,07	0,40	0,77

Жирным шрифтом выделены элементы, чьи концентрации могут представлять промышленную ценность

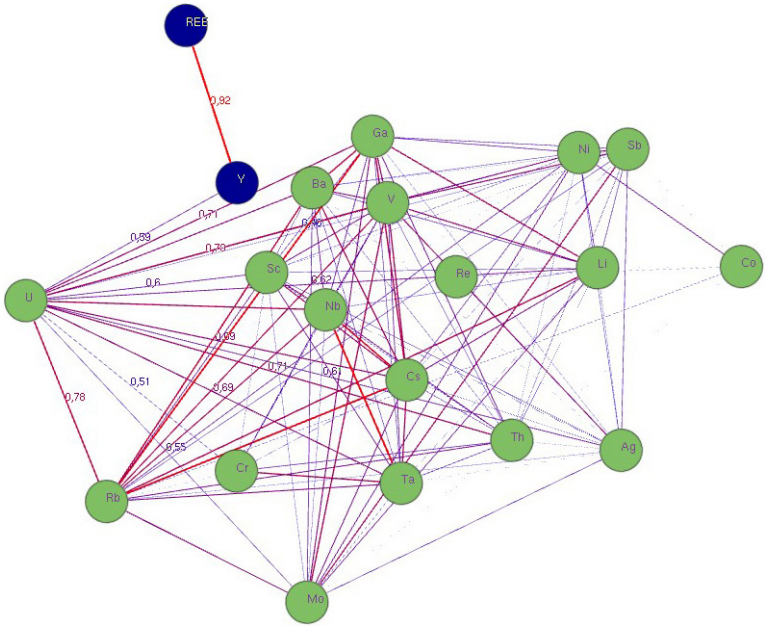


Рис. 6. Ранговая корреляция между ураном и другими элементами (n = 672, значимый коэффициент корреляции r = 0,11)

лах Кайболово-Гостилицкой площади – 814,2 тыс. т. Даже вводя поправочный коэффициент достоверности (к примеру, k = 0,5), получается месторождение урана в ранге уникального.

Заключение. Уран на территории Ленинградской области в диктионемовых сланцах находится преимущественно в рассеянном виде, связан преимущественно с органическим веществом сланца – главным его концентратором.

Уран интенсивно коррелирует с рядом макроэлементов, а также с некоторыми редкими и рассеянными элементами.

Диктионемовые осадки формировались в условиях мелководного моря в восстановительной сероводородной среде. Источником урана в морские воды (и затем в ДС) скорее всего являлись породы кислого состава, выветриваемые в раннепалеозойское время с южного склона Балтийского щита.

Содержания урана в диктионемовых сланцах на территории Ленинградской области могут достигать минимально-промышленных концентраций, отраженных в Государственном балансе запасов [6].

Прогнозные ресурсы урана в ДС Прибалтийского бассейна в пределах Ленинградской области могут достигать нескольких млн. т.

Литература

1. Альтгаузен М. Н. Металлоносные черные сланцы венд-нижнепалеозойского возраста // Oil Shale – Горючие сланцы. Вып. 9/3. Таллин, 1992. – С. 194–207.
2. Вялов В. И., Богомолов А. Х., Михайлов В. А., Семенов Е. В. Ураноносность диктионемовых сланцев Кайболово-Гостилицкой площади Прибалтийского бассейна (Ленинградская область) // Вестник Московского университета, 2017. – № 4. – С. 25–30.
3. Вялов В. И., Ларичев А. И., Балахонова А. С. Рудогенез диктионемовых сланцев и оболовых песчаников Прибалтийского бассейна // Региональная геология и металлогения, 2013. – № 55. – С. 87–98.
4. Вялов В. И., Миронов Ю. Б., Неженский И. А. О металлоносности диктионемовых сланцев Прибалтийского бассейна // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление, 2010. – № 5. – С. 19–23.
5. Неручев С. Г. Уран и жизнь в истории Земли. – Л.: Недра, 1982. – 208 с.; и СПб.: ВНИГРИ, 2007. – 328 с.
6. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. На 01.01.2018 г. Вып. 33. Уран. – М.: ФГБУ Российский федеральный геологический фонд, 2018.

НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ РАДИОАКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ТЭС ПУТЕМ ВСТРАИВАНИЯ ИХ В СТРУКТУРУ СИЛИКАТОВ

Б. М. Гольцман, Е. А. Яценко, С. В. Трофимов

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова
Новочеркасск, Россия, b.goltsman@npi-tu.ru

NEUTRALIZATION OF TPP ASH-SLAG WASTES RADIOACTIVE EFFECT BY INTEGRATING THEM INTO THE STRUCTURE OF SILICATES

B. M. Goltsman, E. A. Yatsenko, S. V. Trofimov

Platov South-Russian Polytechnic University (NPI)
Novocherkassk, Russia, b.goltsman@npi-tu.ru

The efficiency of the use of various matrix materials for the neutralization and immobilization of radioactive waste was considered. The most promising materials were selected – glass-ceramics and non-clinker geopolymer binders. The compositions of the selected materials were developed using ash and slag waste from thermal power plants, their synthesis was carried out, and their properties were investigated. It was shown that both glass-ceramic and geopolymer materials are promising matrices for neutralizing radioactive waste, including TPP ash and slag.

Введение

Одной из самых глобальных проблем угольной энергетики является проблема экологии. Сжигание угля на тепловых электростанциях (ТЭС) ежегодно ведет к образованию более 20 миллионов тонн отходов, включающих золу, шлак и их смеси, состав которых изменяется в зависимости от способа сжигания. Радиоактивность выбросов и сбросов ТЭС определяется радиоактивностью исходного угля и особенностями его сжигания. При сжигании угля на ТЭС за счет выгорания углерода и удаления летучих соединений происходит концентрирование радионуклидов в продуктах сгорания угля. Количество радионуклидов, выходящих в атмосферу, зависит от концентрации их в угле, метода сжигания угля на ТЭС, а также от эффективности улавливания летучей золы [1]. В таблице 1 представлены данные из многочисленных источников по диапазонам удельной радиоактивности разнообразных углей, сжигаемых на ТЭС и по удельной радиоактивности радионуклидов в шлаках и летучей золе ТЭС [2].

Исследования окружающей среды вокруг угольных ТЭС показывают, что для всех приведенных в таблице радионуклидов концентрация в шлаке и золе оказывается почти в 10 раз выше, чем в угле. Похожая обстановка присутствует на всех угольных электростанциях как в России, так и за рубежом [3–4]. Следовательно, при выборе технологии рециклинга золошлаковых отходов ТЭС необходимо учитывать, помимо прочего, способ нейтрализации возможного радиоактивного воздействия ЗШО. Среди перспективных технологий рециклинга данного вида отходов особо выделяется их использование в качестве сырья для силикатных материалов конструкционного назначения. Сравнительный анализ эффективности иммобилизации Cs-137 различными матрицами [5–7], представлен в таблице 2.

Из таблицы видно, что наиболее эффективными материалами для иммобилизации и нейтрализации радиоактивных отходов являются два основных вида материалов: стеклокерамические материалы и щелочеактивированные вяжущие на бесклинкерной основе [5, 7–8]. Также, учитывая возможный повышенный радиационный фон, весьма целесообразным является разработка материалов, которые могут найти применение как материалы II (до 740 Бк/кг) и III

Таблица 1. Концентрации радионуклидов в углях, шлаках и в летучей золе ТЭС, Бк/кг

Изотоп	Уголь	Шлак	Летучая зола
Уран ^{238}U	9–31	56–185	70–370
Радий ^{226}Ra	7–25	20–166	85–281
Торий ^{232}Th	9–19	59	81–174
Калий ^{40}K	26–130	230–962	233–740

Таблица 2. Скорость выщелачивания Cs-137 из различных матриц

Продукт отверждения радиоактивных отходов	Относительная суточная скорость выщелачивания, г/см^2
Керамика и стекло	10^{-5}–10^{-8}
Щелочеактивированные вяжущие	10^{-5}–10^{-6}
Битум	10^{-4}–10^{-6}
Портландцемент (с добавками)	10^{-3}–10^{-5}
Известь, гипс	10^{-1}–10^{-3}

(до 1500 Бк/кг) класса, применяемые в промышленном строительстве и строительстве дорог в пределах и за пределами населенных пунктов. В связи с этим, целью данной работы было исследование возможности получения силикатных материалов на основе золошлаковых отходов ТЭС и анализ их радиологических свойств.

Материалы и методы

В качестве основного исходного сырья был использован золошлаковый отход следующего химического состава, мас. %: SiO_2 – 51,3–59,5; Al_2O_3 – 18,8–24,6; Fe_2O_3 – 10,3–14,0; CaO – 2,4–3,5; MgO – 1,5–3,0; K_2O – 1,2–4,1; Na_2O – 0,9–1,6; SO_3 – 0,7–1,5; ппп – 4–14. Удельная эффективная активность естественных радионуклидов Аэфф составила 237 ± 28 Бк/кг.

Подготовка сырьевых материалов включала их дробление, помол до размера частиц менее 250 мкм, взвешивание и смешивание твердофазных и жидкофазных компонентов в раздельных емкостях, смешивание всех компонентов шихты, формование образцов, термическая и механическая обработка (при необходимости).

1. Получение стеклокерамических материалов

На основе полученных ранее результатов [9–11], были разработаны составы сырьевых смесей, представленные в таблице 3. Их термическая обработка проводилась согласно режиму, представленному на рисунке 1.

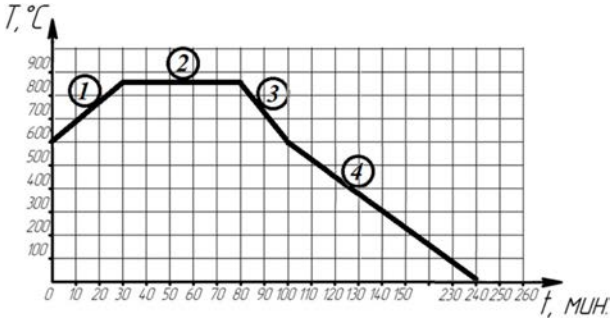


Рис. 1. Температурно-временной режим синтеза стеклокерамических материалов

1 – нагрев; 2 – вспенивание; 3 – резкое охлаждение (фиксация структуры); 4 – охлаждение (отжиг)

2. Получение бесклинкерных геополимерных вяжущих

На основе известных результатов были разработаны составы сырьевых смесей, представленные в таблице 3. Полученную смесь загружали в формы и выдерживали в течение 14 дней при комнатной температуре.

Плотность синтезированных образцов d (кг/м^3) по формуле (1).

$$d = \frac{m}{a \bullet b \bullet c} \bullet 1000, \quad (1)$$

где m – масса образца, г; a – длина образца, см, b – ширина образца, см, c – высота образца, см.

Радиологические характеристики исходных отходов и материалов на их основе исследовались в аккредитованном испытательном лабораторном центре Федерального бюджетного учреждения здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в Ростовской области» на спектрометрической установке МКС-01А «МУЛЬТИРАД».

Результаты и их обсуждение

1. Получение стеклокерамических материалов

Иммобилизация и нейтрализация радиоактивных отходов путем остекловывания включает совместное плавление отходов со стеклообразующими добавками, так что конечный стекловидный продукт включает загрязняющие вещества отходов в свою макро- и микроструктуру. При этом опасные компоненты отходов иммобилизуются либо путем прямого включения в структуру стекла, либо путем инкапсуляции за счет диспергирования нерастворимых соединений в расплаве стекла, так что образующиеся отходы представляют собой стеклокомпозиционный материал, а не гомогенное стекло.

Состав исходных стекол должен не допускать фазового разделения, неконтролируемой кристаллизации и обеспечивать приемлемое сопротивление выщелачиванию [12]. В целом, этим требованиям удовлетворяют отходы бытового и промышленного стекла, обладающие хорошей стеклообразующей способностью, химической стойкостью, механической прочностью и превосходной термической и радиационной стабильностью.

Важной особенностью стекла является постепенное изменение его вязкости при нагреве и охлаждении, вследствие чего номенклатура получаемых стекломатериалов весьма широка. Наиболее перспективным материалом для исследования был выбран пористый стеклокомпозиционный материал, относящийся к группе пеностекольных материалов. Были рассмотрены особенности получения пористых стеклокерамических материалов на основе золошлаковых отходов ТЭС. Свойства полученных образцов представлены в таблице 4, а их внутренняя структура – на рисунке 2.

Из полученных результатов видно, что введение до 50 мас. % ЗШО позволяет получить пористые стеклокерамические материалы с плотностью ниже 500 кг/м^3. Однако из-за высокого содержания тугоплавкого оксида алюминия при повышении количества вводимых золошлаков наблюдается соответ-

Таблица 3. Составы смесей для получения стеклокерамических и геополимерных материалов на основе ЗШО

№ состава	Содержание компонентов, мас. %							
	Шлаковый отход	Стеклобой	Глицерин	Жидкое стекло	Сверх 100			
					Плавень	Вода	NaOH	Al (пудра)
С1	20	70	3	4	–	3	–	–
С2	50	40	3	4	10	3	–	–
Г1	73	–	–	25	–	5	2	–
Г2	73	–	–	25	–	5	2	0,3

Таблица 4. Свойства образцов стеклокерамических материалов на основе ЗШО

№ состава	d, кг/м^3, при температуре вспенивания, °С					$A_{эфф}$, Бк/кг
	800	825	850	875	900	
С1	187	160	138	–	–	66±13
С2	–	–	598	483	426	142±18

ствующий рост тугоплавкости всей смеси, что ведет к повышению температуры вспенивания, а также к повышению плотности готового материала из-за меньшей вспенивающей активности. Активность естественных радионуклидов $A_{эфф}$ снижается пропорционально количеству замещенных ЗШО до 142 и 66 Бк/кг для 50 и 20 мас. % ЗШО в смеси, соответственно.

2. Получение бесклинкерных геополимерных вяжущих

Одним из самых распространенных методов отверждения и кондиционирования радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности является их включение в цементную матрицу. Полученные вяжущие вещества применяются в больших объемах во всех отраслях строительства и поэтому являются наиболее крупнотоннажным видом строительных материалов. Известны два основных вида вяжущих: традиционные (на основе цемента) и бесклинкерные (щелочеактивированные или геополимерные). Основным преимуществом бесклинкерных вяжущих является отсутствие необходимости высокотемпературного (до 1600 °С) синтеза и соответствующее снижение энергозатрат.

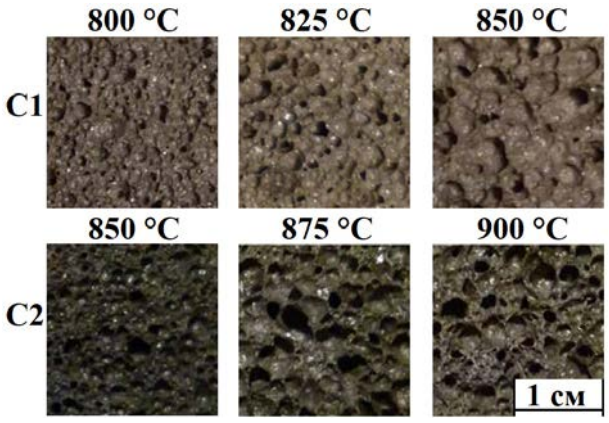


Рис. 2. Внутренняя структура стеклокерамических пен на основе ЗШО

Механизм производства геополимерных материалов основан на реакции щелочной активации алюмосиликатных материалов, в результате которой формируется гелеобразная фаза алюмосиликатов натрия, насыщенная не растворившимися частицами исходного сырья [8, 13].

Полученные материалы после затвердевания сочетают некоторые свойства стекла, керамики и искусственных конгломератов на основе традиционных неорганических вяжущих и могут использоваться в качестве вяжущих для производства бетонов и других конструкционных материалов, матриц огне- и жаростойких, волокнистых композитов, получения низкоэнергоемкой керамики и т. д. При добавлении газообразующих добавок возможно получение аналогов газо- и пенобетонов.

Сочетание низкой проницаемости, высокой прочности, морозостойкости, коррозионной стойкости с высокими ионообменными свойствами продуктов твердения, повышающих химическую и физическую фиксацию отходов в матрице, способностью продуктов твердения образовывать с некоторыми компонентами отходов комплексные соединения, обеспечивает щелочным цементам более высокую эффективность и при использовании их в качестве матриц для безопасной локализации опасных отходов. Свойства образцов геополимерных материалов, полученных на основе золошлаковых отходов, представлены в таблице 5.

Из таблицы видно, что удельная эффективная активность обоих составов снижается пропорционально количеству вводимых отходов. Плотность состава Г1 без дополнительного газообразователя составляет 1760 кг/м^3, что соответствует плотности легких бетонов и объясняется наличием в структуре геополимера пор, связанных с недостаточным уплот-

Таблица 5. Свойства образцов геополимерных материалов на основе ЗШО

№ состава	d, кг/м^3	$A_{эфф}$, Бк/кг
Г1	1760	186 ± 13
Г2	1180	174 ± 17

нением. При введении дополнительного газообразователя (алюминий в виде пудры) плотность материала резко снижается до 1180 кг/м^3, что связано с формированием в структуре материала равномерно распределенных пузырей газа, сформированного по реакции (2):

$$2Al + 2NaOH + 2H2O \rightarrow 2NaAlO_2 + 3H_2 (г) \quad (2)$$

Синтезированные материалы состава Г1 можно использовать в качестве замены традиционным бетонным смесям, а состава Г2 – в качестве альтернативы пористым бетонам как на основе пористых заполнителей, так и газо- и пенобетонов, в которых пористая структура формируется за счет реакций газовыделения. Кроме того, целесообразно продолжить исследования в направлении дальнейшего снижения плотности полученных геополимеров и получения на их основе гранулированного пористого материала для применения в дорожном строительстве.

Заключение

Решение проблемы возможной радиоактивности отходов ТЭС может быть достигнуто путем их иммобилизации в силикатных материалах строительного назначения. Наиболее эффективными материалами для иммобилизации и нейтрализации радиоактивных отходов являются стеклокерамические материалы и щелочеактивированные вяжущие на бесклинкерной основе. Была исследована возможность получения выбранных силикатных материалов на основе золошлаковых отходов ТЭС и проведен анализ их радиологических свойств.

Показано, что введение до 50 мас. % золошлаковых отходов позволяет получить пористые стеклокерамические материалы с плотностью ниже 500 кг/м^3. Однако из-за высокого содержания тугоплавкого оксида алюминия при повышении количества вводимых золошлаков наблюдается соответствующий рост температуры вспенивания. Плотность геополимерных материалов на основе ЗШО без дополнительного газообразователя соответствует плотности легких бетонов. При введении дополнительного газообразователя) плотность материала резко снижается. Синтезированные материалы можно использовать в качестве замены традиционным и пористым бетонам Активность естественных радионуклидов для обоих материалов снижается пропорционально количеству замещенных отходов.

Таким образом, показана эффективность, дальнейшая целесообразность использования композиционных силикатных материалов и высокая перспективность их использования в качестве матричных материалов для иммобилизации токсичных и радиоактивных отходов. Однако практическое внедрение данных технологий требует проведения дальнейших исследований и испытаний, технологической адаптации и разработки нормативной документации.

Работа выполнена в ЮРГПУ(НПИ) при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках соглашения № 21-19-00203 «Эффективные температуроотверждаемые экогеополимеры для дорожного строительства в условиях Арктической зоны Российской Федерации на основе отходов сжигания твердых топлив на местных ТЭЦ» (руководитель – Яценко Е. А.).

Литература

1. Овсейчук В. А. Радиационные выбросы от угольных ТЭС / В. А. Овсейчук, Д. А. Крылов, Г. П. Сидорова // Вестник Забайкальского государственного университета, 2012. – № 10 (89). – С. 24–29.
2. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде: Радиоэкология после Чернобыля / [Л. Дж. Апплби, Л. Девелл, Ю. К. Мишра и др.]; Под ред. Ф. Уорнера и Р. Харрисона; Пер. с англ. Д. В. Гричука и др. – М.: Мир, 1999. – 511 с.
3. Ramme B. W. We Energies Coal Combustion Products Utilization. Handbook / B. W. Ramme, M. P. Tharaniyil. – 3rd Edition. – Wisconsin: We Energies, 2000. – 438 p.
4. Крылов Д. А. Радиоактивность углей / Д. А. Крылов, В. А. Овсейчук, Г. П. Сидорова // Энергия: экономика, техника, экология, 2015. – № 5. – С. 2–11.
5. Кривенко П. В. Специальные шлакощелочные цементы / П. В. Кривенко. – Киев: Будивельник., 1992. – 192 с.
6. Long-term leach testing of solidified radioactive waste forms: ISO 6961:1982. – Publication date: 1982-10. – 6 p.
7. Рахимов Р. З. Шлакощелочные вяжущие, растворы и бетоны для защиты от экологической и радиационной опасности / Р. З. Рахимов, Н. Р. Рахимова, М. И. Ожован // Вопросы радиационной безопасности. – № 3. – 2012. – С. 11–17.
8. Рахимова Н. Р. Композиционные вяжущие для иммобилизации токсичных и радиоактивных отходов / Н. Р. Рахимова, Р. З. Рахимов, О. В. Стоянов // Вестник Казанского технологического университета, 2013. – Т. 16. – № 4. – С. 175–182.
9. Яценко Е. А. Исследование макро- и микроструктуры пеностекол на основе шлаковых отходов

ТЭС / Е. А. Яценко, В. А. Смолий, Б. М. Гольцман, А. С. Косарев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 2012. – № 6 (169). – С. 127–130.
10. Yatsenko E. A. Investigation of the influence of foaming agents' type and ratio on the foaming and reactionary abilities of foamed slag glass // E. A. Yatsenko, B. M. Goltsman, V. A. Smoliy, A. S. Kosarev, R. V. Bezuglov // Biosciences Biotechnology Research Asia, 2015. – V. 12. – № 1. – P. 625–632.
11. Гольцман Б. М. Комбинирование шлаков при производстве теплоизоляционных материалов / Б. М. Гольцман // Научное обозрение, 2014. – № 6. – С. 75–78.
12. Ojovan M. I. Glassy Wasteforms for Nuclear Waste Immobilization / M. I. Ojovan, W. E. Lee // Metallurgical and Materials Transactions A., 2011. – Vol. 42 (4). – P. 837–851.
13. Ojovan M. I. An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation / M. I. Ojovan, W. E. Lee. – 2nd Edition. – Elsevier, 2014. – 362 p.

АНАЛИЗ НОВЫХ ОТКРЫТИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА ТИПА «НЕСОГЛАСИЯ» ВПАДИНЫ АТАБАСКА (ПРОВИНЦИЯ САСКАЧЕВАН, КАНАДА)

Н. А. Гребенкин, М. А. Рогожина, А. К. Ржевская, И. Е. Чистякова

Всероссийский институт минерального сырья, ФГБУ «ВИМС»
Москва, Россия, grebenkin@vims-geo.ru, vims@vims-geo.ru, rzhevskaya@vims-geo.ru

ANALYSIS OF NEW DISCOVERIES OF UNCONFORMITY-RELATED URANIUM DEPOSITS IN THE ATHABASCA BASIN (SASKATCHEWAN, CANADA)

N. A. Grebenkin, M. A. Rogozhina, A. K. Rzhevskaya, I. E. Chistyakova

All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N. M. Fedorovsky (FSBI VIMS)
Moscow, Russia, grebenkin@vims-geo.ru, vims@vims-geo.ru, rzhevskaya@vims-geo.ru

The analysis and summary of the successful experience of prospecting for concealed un-conformity-related uranium deposits in the Athabasca Basin, Saskatchewan province (Canada) on the basis of published reports of companies engaged in prospecting and exploration of these de-posits is carried out. It is concluded, that the success of the prospecting is due to a complex of methodological and organizational factors. Recommendations for changing some methodological approaches in the organization of domestic exploration practice are given

Высокая степень изученности территории России аэро- и наземными радиометрическими методами привела к тому, что возможности открытия урановых месторождений, выходящих на дневную поверхность, фактически исчерпаны. В результате возникла необходимость поиска скрытых и слабо проявленных объектов. В связи с этим представляет интерес изучение успешного опыта поисков таких месторождений в Канаде в провинции Саскачеван во впадине Атабаска, проведенное нами на основе опубликованных материалов юниорных компаний, осуществляющих в настоящее время ГРР (CoEX Corporation, UEX Corporation, Denison Mines, Iso Energy Ltd., Skyharbour Resources Ltd, Purepoint Uranium Group Inc, Rio Tinto Group, ALX Resources, CanAlaska Uranium, Fission Uranium, Fission 3.0, NexGen Energy).

Месторождения урана в бассейне Атабаска пространственно связаны с предрифейским структурно-стратиграфическим несогласием (ССН), представляющим собой границу архей-нижнепротерозойского кристаллического фундамента и нижнерифейского осадочного чехла. Аналогичные региональные перспективные зоны предрифейского ССН выявлены и на территории России – в пределах южного обрамления Сибирского кратона, на Анабарском и Балтийском щитах. Именно поэтому изучение геологических особенностей месторождений типа «несогласия» впадины Атабаска, методов и методики проведения геологоразведочных работ (ГРР) имеет важное научно-практическое значение для отечественной урановой геологоразведки. Применение успешного зарубежного опыта позволит повысить эффективность поисковых работ на тип «несогласия» в России.

Краткая история ГРР во впадине Атабаска

Первые урановые месторождения в провинции Саскачеван были открыты в начале 1950-х годов. Они характеризовались рядовыми бедными рудами, располагались на дневной поверхности за пределами бассейна Атабаски, в его северном обрамлении, не были связаны с зоной ССН и не относились к типу «несогласия».

В период с 1968 по 1977 г. ГРР во впадине Атабаска были направлены в основном на открытие неглубоко залегающих месторождений, пригодных для разработки открытым способом. В том числе в 1975 г. при открытии месторождения Key-Lake было установлено, что рудные зоны и тела контролируются графитовыми пелитовыми гнейсами, которые отвечают зонам электропроводности, что явилось важным шагом в развитии геолого-поисковой модели.

В 1977 г. по результатам бурения в пределах ореола радиоактивных валунов, на глубине более 300 м от дневной поверхности было выявлено месторождение Midwest. Обнаружение этого объекта позволило активизировать поисковые работы, что в дальнейшем привело к открытию месторождений урана, залегающих на значительных глубинах.

1978 г. ознаменовался открытием месторождения Down Lake, 1979 г. – McClean Lake, 1981 г. – найдена «урановая жемчужина» месторождение Cigar Lake, которое в настоящее время признано самым богатым и вторым по запасам урана в мире, а в 1988 г. – McArthur River, одно из крупнейших по запасам урана в мире и второе после месторождения Cigar Lake по содержанию урана.

С 1990 по 2000 гг. из-за обвала рынка цен на уран поиски в бассейне Атабаска носили локальный характер. В этот период только крупные компании, такие как Cameco и Areva, продолжали финансировать поисковые работы, хотя и в меньших объемах, но главным образом в пределах или вблизи существующих месторождений. Однако в этот период времени активные ГРР осуществлялись в западной части бассейна Атабаска южнее структуры Carswell в пределах района Shea-Creek. Они привели к открытию группы месторождений Shea-Creek (Anne, Colette, Kianna). Статус месторождений эти объекты получили только в начале 2000-х годов.

С 2000 г. и по настоящее время – новый этап ГРР во впадине Атабаска. По разным оценкам за этот период обнаружено более 10 месторождений с суммарными запасами около 400 тыс. т U_3O_8 (Рис. 1). Среди них (тыс. т U_3O_8): 2000 г. – Millennium (29,2), 2004 г. – Centennial (около 20,0), 2005 г. – Tamarack (6,9), 2008 г. – Roughrider (более 15,0) и Phoenix (27,1), 2010 г. – J zone (5,8), 2011 г. – Fox Lake (26,2), 2012 г. – Triple R (39,4), 2014 г. – Gryphon (22,5) и Arrow (106,3), 2017 г. – Huskie (2,6) и Orora (1,6), а также другие объекты, в том числе перспективные проявления, на которых в настоящее время продолжаются поисковые и поисково-оценочные работы. Все эти объекты являются скрытыми, а отчасти перекрытыми месторождениями, располагаясь на глубинах в сотни метров; контролируются углеродистыми формациями и локализуются в зоне ССН или вблизи нее; характе-

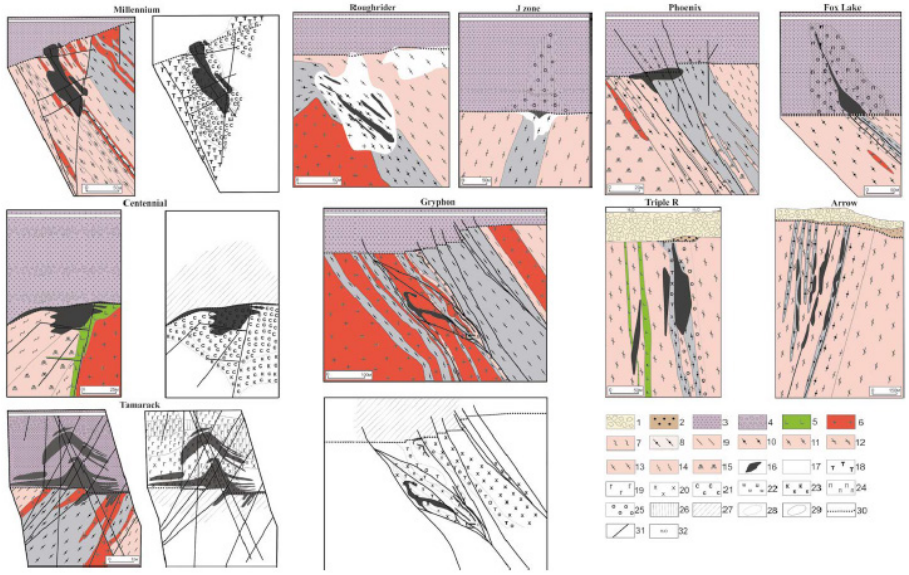


Рис. 1. Геологические разрезы по месторождениям типа «несогласия», в том числе с ореолами околорудных изменений. Построены с использованием опубликованных отчетов компаний, осуществляющих ГРР во впадине Атабаска

1–4 – осадочный чехол: 1 – озерно-ледниковые отложения (Q); 2 – песчаники (D); 3 – песчаники (RF_1); 4 – конгломераты (RF_1); 5 – породы основного состава ($RF_{1–2}$); 6–15 – кристаллический фундамент (AR–KR_2): 6 – гранитоиды и пегматиты (KR_2); 7 – кварц-хлорит-мусковитовые филлиты; 8 – зоны графитизации и графитсодержащие пелитовые гнейсы, нередко с кордиеритом; 9 – пелитовые гнейсы без графита; 10 – гранатсодержащие пелитовые гнейсы; 11 – кальций-силикатные гнейсы; 11 – полупелитовые гнейсы; 13 – ортогнейсы; 14 – гранито-гнейсы; 15 – кварциты; 16 – рудные тела; 17–27 – ореолы околорудных изменений: 17 – иллит, серицит, минералы группы глин; 18 – турмалин (дравит); 19 – гематит; 20 – хлорит; 21 – судоит; 22 – шамозит; 23 – клинохлор; 24 – пирит; 25 – друзовидный кварц и зоны окварцевания; 26 – зоны десиликации; 27 – нерасчленённые и неоконтурённые околорудные изменения; 28 – граница развития ореолов околорудных изменений; 29 – геологические границы; 30 – граница ССН; 31 – разломы; 32 – озера.

ризуются широкими ореолами гидротермально-метасоматических изменений. Особый интерес представляет новая обособленная региональная зона Paterson Lake, где выявлены месторождения Triple R и Arrow.

Анализ и обобщение геологических материалов и данных, освещающих историю открытия месторождений типа «несогласия» во впадине Атабаска, обнаруженных после 2000-х годов, позволяют сделать следующие выводы:

1. Канадские месторождения типа «несогласия» – это объекты, состоящие из рудных тел, размеры которых не превышают десятки и первые сотни метров. При этом они имеют скрытый характер залегания, располагаются под чехлом современных озерно-ледниковых отложений и рифейских песчаников, суммарная мощность которых варьирует от первых десятков до 800 м. В России схожие скрытые месторождения, но малые по масштабам, выявлены в обрамлении Сибирской платформы и на Балтийском щите.

2. При проведении поисковых работ зарубежные геологи неукоснительно следуют принятой прогнозно-поисковой модели. Несмотря на частые неудачи, они упорно возвращаются к ранее обнаруженному проводнику – главному элементу этой модели. Для отечественных месторождений типа «несогласия» имеются исключительно предварительные поисковые модели или макеты, степень достоверности которых невысока. Разработка прогнозно-поисковых моделей является одной из главных задач отечественной урановой геологоразведки.

3. Территории опоискования во впадине Атабаска, на которых открыты месторождения в 2000-х годах, стали объектами ГРР еще в 1960–1980-е годы. Количество поисковых заданий на одной площади могло достигать 5, 7 и более, а нередко поисковые работы велись беспрерывно на протяжении десятков лет с большими объемами бурения. Несмотря на это, спустя 30–40 лет после начала первых ГРР, с начала 2000-х годов во впадине Атабаска ежегодно открываются новые месторождения. Российские геологи уже на стадии выделения перспективных площадей на тип «несогласия» нередко бракуют территории с относительно высокой буровой изученностью, забывая о том, что месторождения этого типа представляют собой глубокозалегающие рудные тела небольших размеров.

4. Главными поисковыми методами являются многочисленные модификации электроразведки, преимущественно в аэроварианте. При этом, если какой-то электроразведочный метод не приносит результата, разрабатывается его модификация, которая успешно выявляет проводники – объекты последующих ГРР. Попутно осуществляются другие методы: аэрогамма-съемка, гравиметрия, минералогические исследования (гиперспектральные и др.), геоморфологический анализ и т. д., нацеленные на выявление и изучение зон околорудных изменений, радиоактивных и литогеохимических аномалий. Эти работы, как правило, предваряются ревизией некогда перспективных площадей и участков, в том числе с изучением старого керна. На перспективных площадях в России, так же, как и в Канаде, электроразведочные технологии активно применяются на стадии поисков, а новые методы и методики перед проведением ГРР в последнее время проходят предварительную апробацию на отечественных эталонных объектах скрытого типа.

5. Очередное поисковое задание в бассейне Атабаска всегда начинается с опережающих аэроэлектроразведочных работ, а одна и та же перспективная площадь может быть закрыта многократно электроразведочной съемкой. При этом, если площадь отвечает рангу рудного узла (сотни км^2), зарубежные компании, несмотря на значительный ее размер, проводят детальные аэрогеофизические исследования масштаба 1 : 10000. С точки зрения отечественной геологоразведочной практики, проведение поисковых работ масштаба 1 : 10000 на таких крупных площадях - ранга рудного узла и, в некоторых случаях, района - является нарушением методики ГРР.

6. В процессе опоискования перспективных территорий впадины Атабаска скважинами нередко вскрываются отдельные рудные тела, но не всегда при последующем бурении они переходят в разряд месторождений. В некоторых случаях только спустя 6–10 лет после выявления первого перспективного пересечения удается обнаружить месторождение. В России сроки проведения всего комплекса поисковых работ, включающие написание проекта и окончательного отчета, составляют 3 года.

7. Зарубежные компании на практике никогда не соблюдают стадийность ГРР и не планируют на перспективу методы, направление сетей и шаг геолого-геофизических исследований. Они действуют исходя из полученных на текущий момент времени результатов. Постановка каждой скважины определяется конкретными, актуальными на данный момент времени геолого-геофизическими данными. В России же в проекте ГРР предусматриваются виды и объемы работ, а также последовательность их реализации на весь период поисковых работ.

На территории России поисковые работы на уран на тип «несогласия» осуществлялись и осуществляются эпизодически. Поиски таких месторождений в настоящее время предваряются детальными прогнозными исследованиями с выделением площадей, разработкой геолого-поисковой модели, а также апробацией и внедрением эффективных методов. Решением этих задач активно занимаются отраслевые НИИ, подведомственные Роснедра, при поддержке академических институтов и производственных организаций. В то же время, некоторые ме-

тодические подходы, используемые при отечественной организации ГРР, противоположны подходам, используемым при организации поисковых работ во впадине Атабаска, и оказывают негативное влияние на результаты поисков.

Решить вышеперечисленные, преимущественно организационные проблемы возможно было бы путем привлечения к поискам урана юниорных компаний, но, к сожалению, сложное и противоречивое российское законодательство в сфере ГРР, добычи и переработки урана, приумноженное на низкие цены на этот металл, отпугивает юниоров. В этой связи оптимальный вариант решения проблем поисков скрытых месторождений урана, а также других видов ТПИ, обусловлен введением в стадийность ГРР новой стадии опережающих поисков или прогнозно-минерагенических работ на площадях ранга рудного узла – рудного района. Причем эти ГРР всегда должны предваряться камеральными прогнозными исследованиями, ревизионными и опытно-методическим работами. Последние необходимо проводить хотя бы на типовых скрытых рудопроявлениях и малых месторождениях. Сами прогнозно-минерагенические работы должны осуществляться в течение 4–5 лет с привлечением значительного объема опережающих аэрогеофизических исследований масштаба 1 : 10 000 с последующим проведением на выделенных локальных участках небольших объемов наземных геолого-геофизических работ и заверочного бурения. Планирование ГРР должно быть гибким, с возможностью оперативного корректирования видов и объемов работ, направления сетей и шага исследования. Открытие месторождений типа «несогласия», в связи с их скрытым характером и малыми размерами, - весьма сложная задача, которая требует не только профессионального подхода и высокой организации, но и невозможна без таких человеческих качеств, как упорство и вера в конечный результат.

ПЕРСПЕКТИВЫ УРАНОНОСНОСТИ КОРГОНСКОГО ПРОГИБА АЛТАЯ

А. И. Гусев

Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В. М. Шукшина
г. Бийск, Россия, anzerg@mail.ru

PERSPECTIVES OF URANIUM-BEARING KORGON TROUGH ALTAY

A. I. Gusev

Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University
Biysk, Russia, anzerg@mail.ru

Metallogenic peculiarities of uranium ore mineralization and it connections with Au, Co, Fe, Sc, Pb, Zn, REE discerned. Uranium ore mineralization occurs 2 class objects: 1 – proper uranium with 2 types associations: uranium-sulfides, characterized by link with Mo, As, Pb, Zn, Cu, Co, and uranium-phosphor with stable link uranium with phosphor in form apatite; 2 – complex U-Th-REE-rare metals, where U and Th appear one from basic components. 3 complex ore districts with uranium ore mineralization detached: 1 – Korgon-Kumin scandium-uranium-molybdenum-gold-rare earth elements, 2 – Kumir scandium-uranium-thorium-molybdenum-rare earth elements, 3 – Kedr-Kytmin uranium-scandium-molybdenum-rare earth elements.

Введение

Согласно проекта «Стратегии развития минерально-сырьевой базы России до 2035 года», приоритетом является «достижение экономического баланса между необходимым и достаточным внутренним потреблением, экспортом и вынужденным импортом минерального сырья. Иными словами, в первую очередь надо искать стратегические металлы: уран, скандий, рений, тантал, ниобий, иттрий, галлий, гадолиний, лантан и другие.

Стратегические виды природного минерального сырья составляют основу ведущих отраслей производства, обеспечивающих экономическую и оборонную безопасность любого государства. Особую роль в структуре этого сырья играют уран и торий, играющие первостепенную роль в развитии оборонной промышленности и энерго-источника России [6]. По данным World Nuclear Association на 2013 год добыча урана в России составляла 3135 тонн в год (5,26 % от мировой добычи), а российские запасы урана по данным на 2015 год оценена в 507800 тысяч тонн (9 % от мировых запасов). Для долгосрочного сырьевого обеспечения потребностей в уране «Росатом» в 2010 году приобрёл канадскую компанию Uranium One и консолидировал на её основе высокоэффективные урановые активы в Казахстане и других странах. За последние 10 лет производство Uranium One выросло почти в 5 раз, что позволило выйти на 4-е место в мире среди урановых компаний [2]. По данным это-

го же источника в 2018 году Россия по мировым запасам вышла на 3 место в мире 505900 тонн (8,57 % мировых запасов). Этого количества для России не достаточно. Стране нужен уран. В мире нарастает конкурентная борьба за сферы влияния и природные ресурсы, в которой современное вооружение, в том числе и ядерное, будет иметь определяющее значение. Это потребует дополнительных ресурсов стратегических металлов, к которым относится и уран [7].

В Коргонском прогибе Алтая известно комплексное скандий-уран-редкометальное Кумирское месторождение [1], а также многочисленные проявления самых различных геолого-промышленных типов, которые не доизучены и требуют проведения оценочных работ.

Приведенные данные указывают на актуальность изучения перспектив Коргонского прогиба Алтая на урановое оруденение. Следует отметить, что в пределах прогиба и его обрамлении уран тесно ассоциирует и с другими металлами, имеющими стратегическое значение (скандий, редкие земли, рений).

Материалы и методы

В основу сообщения положены авторские материалы, собранные в процессе проведения ГДП-200 и специализированных металлогенических исследований, проведенных в период с 2003 по 2021 годы.

Термобарогеохимия и флюидный режим рудообразования изучались в двусторонне-полированных пластинках методом гомогенизации газово-жидких включений в Лаборатории ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). Изотопные анализы свинца выполнены на масспектрометре МИ 1201В в лаборатории ИГЕМ РАН (г. Москва).

Результаты и обсуждение

Проявления урановой минерализации в Коргонском прогибе многообразны и по ассоциациям компонентов их можно подразделить на 2 класса:

1. Собственно урановые, представленные двумя типами ассоциаций: уран-сульфидной, характеризующейся связью урана с Mo, As, Pb, Zn, Cu, Co, и уран-фосфорной – с устойчивой связью урана с фосфором в форме апатита.

2. Комплексные U-Th-редкоземельно-редкометалльные, где уран и торий являются лишь одними из главных компонентов.

Уран-сульфидный тип подразделяется на два подтипа. Для первого – уран-молибденового – типичны парагенезисы урановых минералов (уранинит, настуран, коффинит) с молибденитом, пиритом, арсенопиритом, кобальтином и пирротином. Сюда относятся Агеевское проявление и пункты минерализации вблизи него, а также урановая минерализация, наложенная на руды Тимофеевского и Владимировского скарновых месторождений.

Проявление Агеевское находится на водоразделе р. Кума и руч. Кедровый. В передробленных, гидротермально измененных туфах риолитов, сильно аргиллитизированных, развиты настуран, браннерит, коффинит, молибденит, галенит, сфалерит, циркон в виде вкрапленности и гнёзд. Содержание элементов (в %): U – до 3,0; As – до 2; Mo – до 0,6; Zr – до 0,2; Pb – до 0,4; Y – до 0,015; Hg – до 0,03; Co – до 0,005; Ag – до 20 г/т, Re – от 15 до 120 г/т. По содержанию урана в рудах проявление относится к супербогатым (более 0,3 %). Коэффициент радиоактивного равновесия 1,0–1,25. Прогнозные ресурсы урана категории P_2 оценены в 300 тонн. Проявление по составу имеет сходство со Стрельцовским (Забайкалье).

Проявление **Затяжное** находится на водоразделе рек Кедровка – Черновая. В вулканитах коргонского комплекса прослежена зона дробления и минерализации на 1 км СЗ простирания, контролирующая уран-сульфидное оруденение. Браннерит, пирит, халькопирит слагают прожилки, гнезда, крайне неравномерно распределенные в породе. Содержание элементов (в %): U – 0,15, Th – 0,002. Прогнозные ресурсы категории P_2 составляют (тонн): U – 230, Th – 85. Это проявление находится южнее проявления Спартак и приурочено также к зоне разлома запад-северо-западного простирания.

Для второго (уран-полиметаллического) подтипа характерна ассоциация уранинита и настурана с сульфидами Cu, Pb, Zn, Bi и барием – проявления Урман, Шаный.

Проявление **Шаный** находится в левом борту р. Чарыш. В окварцованных, серицитизированных, карбонатизированных, альбитизированных кислых вулканитах коргонского комплекса – повышенные содержания U (до 0,01 %), Cu (1–8 %), Pb (до 0,3 %), As (до 0,3 %), Mo (до 0,03 %). Распределение оруденения в виде гнезд и линз до 1,5 × 0,3 м.

Проявления **уран-фосфорной** формации разделяются на 2 подтипа: 1) осадочный (экзодиагенетический) и 2) гидротермально-метасоматический. Типоморфными для первого подтипа являются проявления Совиное и Кучкурское, представленные линзами ураноносных известковистых алевролитов, обогащенных фосфатным веществом, среди песчаников среднекоргонской подсвиты. Мощность 0,3–1,0 м, видимая протяженность до 8 м. Содержание U до 0,016 %, Th до 0,006 %, фосфора до 7,26 %. Проявления относятся к песчаниковому типу [3].

Гидротермально-метасоматические проявления связаны с альбитизацией и серицитизацией осадочно-вулканогенных образований: Красноярское, Агат и др. Оруденение определяется вкрапленностью урановых титанатов.

Проявление **Красноярское** находится в правом борту одноименной реки. Среди эффузивно-осадочной толщи выявлены радиоактивные аномалии, связанные с уран-титановой и апатитовой минерализацией, сопровождающиеся квальмитами. Содержа-

ние U до 0,019 %, P_2O_5 до 3,6 %, Nb_2O_5 до 0,044 %. В аномальных концентрациях отмечены Y, Zr и Sc – до 100 г/т

Уран-торий-редкоземельно-редкометальный тип объединяет Кумирское месторождение, проявления Спартак и др. Каждый из этих объектов является одной из составных частей вертикальной зональности рудно-формационного ряда, отличающейся от другой соотношением рудных компонентов при ведущей роли редких земель.

Уран-редкометалльное проявление **Спартак** представлено штокверком (150–400 м) в гидрослюдизированных и альбитизированных кислых вулканитах с гнездово-прожилковой вкрапленностью уран-молибденовой минерализации, сопровождающейся высокой концентрацией редкоземельных элементов, в основном, иттриевой группы. Оно локализуется в контактовой зоне экструзии риолитов среди слюдистых и кварц-полевошпатовых метасоматитов (квальмитов) вторично-кварцитового или березитового температурного уровня. Квальмиты широко распространены на известном месторождении Арыскан (Тува) [4, 5]. Содержания элементов (в %): Y – 0,46, Sc – 0,18, Dy – 0,17, U – 0,15; Re – 50–130 г/т. Извлечение из руды редких земель: 96–98,7 %. Прогнозные ресурсы (P_2) составляют (в тоннах): Y – 1310, Yb – 81, U – 248, Mo – 58, Sm – 124, Eu – 40, Gd – 215, Tb – 44, Dy – 323, Ho – 99, Er – 104. Прогнозные ресурсы категории P_2 составляют (в тоннах): U – 248, Th – 95.

Кумирское месторождение представляет собой более глубинный объект по сравнению со Спартаком. Месторождение сложено комплексными рудами при ведущей роли скандия, образующего собственный минерал (тортвейтит) в скоплениях, представляющих промышленный интерес. Оруденение приурочено к эндо-экзоконтактовой зоне Кумирского штока. Скандий-уран-редкометалльное оруденение образует линзовидные тела и гнёзда размером до 0,5 х 1,2 х 2,5 м, контролируемые метасоматическими залежами (альбит, серицит, турмалин, кварц), обычно крутопадающими и субвертикальными. Оно накладывается на субвулканические риолиты и на ороговикованные породы кумирской свиты. Рудные минералы: тортвейтит, гадолинит, талинит, иттриалит, иттробритолит, монацит, касситерит, уранинит, браннерит, коффинит, настуран, метацейнерит, эпиянтинит, торит, ортит. Присутствуют: пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит, галенит, арсенопирит, берилл, флюорит, турмалин, фторапатит, топаз. Содержания РЗЭ (в окисной форме) в рудах составляет тысячные – десятые доли процента для каждого элемента. Содержание скандия – сотые до десятых долей процента. Содержания урана и тория колеблются от тысячных до первых сотых долей процента, достигая в единичных случаях 0,284 и 0,396 % на мощность 0,5 и 0,1 м., соответственно.

Рудный процесс протекал в несколько стадий. Наиболее ранним агрегатом является кварц-пирит-тортвейтитовый с минералами редких земель – гадолинитом, абакумолитом, таленитом, ортитом, монацитом. В этой ассоциации отмечаются также фторапатит и турмалин. Температура гомогенизации газово-жидких включений в кварце этой ассоциации варьирует от 320 до 285 °С. Секущие прожилки кварца 2 генерации с бериллом, топазом, гадолинитом и бертрандитом сопровождались интенсивной флюоритизацией. Гомогенизация газово-жидких включений кварца 2 генерации происходила при температурах 240–210 °С. Самый поздний агрегат включал сидерит-кальцитовые прожилки с флюоритом 2 генерации и уранинитом, настураном, коффинитом и другими более редкими уран-ториевыми минералами. Изредка в этой ассоциации встречаются гнёзда галенита размерами до 1,5 см в поперечнике. Гомогенизация газово-жидких включений в сидерите осуществлялась при температурах 190–170 °С. Концентрации изотопов свинца в галените этой ассоциации составляют: Pb^{204} = 1,39, Pb^{207} = 21,21, Pb^{206} = 24,05, Pb^{208} = 52,05 [4]. На диаграмме соотношений $^{207}Pb/^{204}Pb$ – $^{206}Pb/^{204}Pb$ галенит Кумирского месторождения попадает в поле EM I (рис. 1) – источник обогащённой мантии типа EM I с участием нижнекорового материала и плюмового компонента.

Запасы и прогнозные ресурсы ($C_2 + P_1 + P_2$) скандия, иттрия, урана, тория, рубидия и ниобия по отдельности составляют сотни тонн. Их подсчёт и оценка велись только в пределах опоискованных блоков, но и эти данные позволяют отнести месторождение к типу мирового класса.

В результате проведенных работ выделены 3 комплексных рудных узла с урановым оруденением (рис. 2).

Заключение

В Коргонском прогибе Алтая развито разнообразное урановое оруденение, пространственно ассоциирующее с редкоземельным, скандиевым, железорудным, свинцово-цинковым, золото-серебряным и кобальтовым оруденением. Набор типоморфных металлов в рудах различных геолого-промышленных типов оруденения свидетельствует о сложных мантийно-коровых процессах генетически ответственных за формирование рудных объектов. Выделены 3 комплексных скандий-уран-редкоземельных рудных узла, в которых, собственно урановая минерализация, накладывается на более высокотемпературные ранние скарновые и грейзеновые парагенезисы. Запасы и прогнозные ресурсы урана в металлогенических юнитах значительны. Наиболее перспективным является тип уранового оруденения, связанный с вулканогенными и субвулканическими образованиями коргонского комплекса

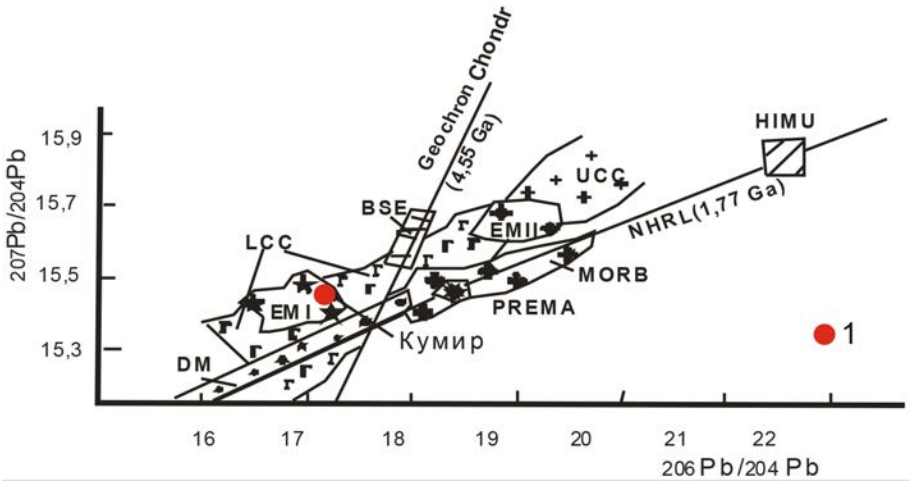


Рис. 1. Диаграмма $^{207}Pb/^{204}Pb$ – $^{206}Pb\backslash^{204}Pb$ по [8] в галените месторождения Кумир

PREMA – превалирующая мантия; DM – деплетированная мантия; HIMU – компонент мантии, обогащённый радиогенным свинцом; EM I – обогащённая мантия нижнекоровым компонентом; EM II – обогащённая мантия верхнекоровым компонентом; MORB – океанические базальты; BSE – валовый состав Земли; LCC, UCC – нижне- и верхнекоровый компоненты; Geochron Chondr – хондритовая геохрона; NHRL – положение изотопной корреляционной диаграммы в северной полусфере от проверочной линии. 1 – Галенит Кумирского месторождения.

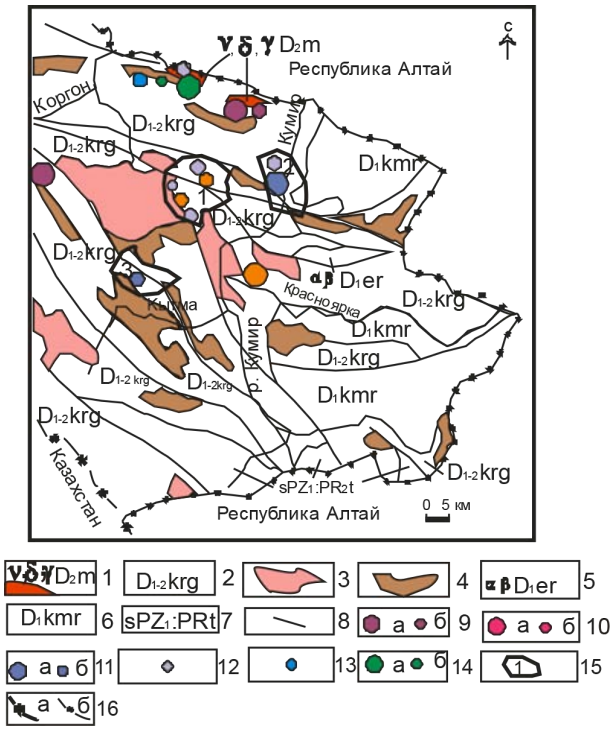


Рис. 2. Схема размещения полезных ископаемых Коргонского прогиба

1 – Габбро, диориты, граниты майорского комплекса; коргонский комплекс: 2 – лавы, туфы, игнимбриты дацитов, риолитов, трахириолитов коргонской свиты; 3 – субвулканические плагиограниты, лейкоплагиограниты; 4 – экструзии трахириолитов, трахириодацитов; 5 – лавы, туфы андезибазальтов, базальтов ергольской свиты; 6 – песчаники, алевропесчаники, алевролиты, мрамора кумирской свиты; 7 – метапелитовые сланцы терехтинского метаморфического комплекса; 8 – разломы; полезные ископаемые: 9 – скарновые месторождения (а) и проявления (б) железа; 10 – высоко-сульфидизированные эпитермальные золото-серебряные месторождения (а) и проявления (б); 11 – комплексные грейзеново-гидротермальные скандий-торий-уран-редкоземельные месторождения (а) и проявления (б); 12 – гидротермальные и эпитермальные урановые проявления; 13 – эпитермальные свинцово-цинковые проявления; 14 – скарновые кобальтовые месторождения (а) и проявления (б); 15 – контуры рудных узлов и их номера: 1 – Коргоно-Куминский скандий-уран-молибден-золото-редкоземельный, 2 – Кумирский скандий-уран-торий-молибден-редкоземельный, 3 – Кедровско-Кытминский уран-скандий-молибден-редкоземельный; 16 – границы: государственная (а), административная (б).

Литература

1. Гусев А. И., Гусев Н. И., Ефимова И. В. Магматизм и оруденение Кумирского рудного поля, Горный Алтай // Руды и металлы, 2009. – № 6. – С. 21–28.
2. Балихин А. В. Минерально-сырьевая база урана: современное состояние и перспективы развития. Обзор // Комплексное использование минерального сырья, 2019. – № 1. – С. 36–50.
3. Домаренко В. А., Воробьёв Е. А., Молчанов В. И., Мазуров А. К. Основные результаты и перспективы развития геологоразведочных работ на радиоактивное сырьё в Центрально-Сибирском регионе // Известия Томского политехнического университета, 2009. – Т. 314. – № 1. – С. 92–101.
4. Лебедев Н. И. Минеральные ресурсы Тувы: обзор и анализ полезных ископаемых. – Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2012. – 284 с.
5. Некрасов И. Я. Особенности приоритета из Арысканского редкоземельного месторождения (Тува) // Докл. АН, 1995. – Т. 345. – № 2. – 234–236.

6. Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года. / Правительство Российской Федерации. РАСПОРЯЖЕНИЕ от 22 декабря 2018 г. – № 2914-р. – 27 с.
7. International Institute for Strategic Studies. Military Balance 2018. – London: Taylor & Francis Ltd., 2018. – 517 p.
8. Zindler A., Hart S. R. Chemical geodynamics // Ann. Rev. Earth Planet Sci, 1986. – V. 14. – P. 493–571.

ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ЗОЛОТО-УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЭЛЬКОНСКОГО РАЙОНА

А. А. Данилов[1], И. Д. Гласс[1], Е. С. Овчарова[1], В. Ю. Фомин[1], А. А. Руденко[2], В. Г. Журавлев[3], В. А. Домаренко[4]

[1]ООО «ГРП»
Москва, Россия, danilov@utzm.com
[2]АО «РУСБУРМАШ»
Москва, Россия rudall2007@yandex.com
[3]АО «Эльконский ГМК»
Москва, Россия, valgezhuravlev@rosatom.ru
[4]Томский политехнический университет
Томск, Россия, viktor_domarenko@mail.ru

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF AURUM-URANIUM DEPOSITS IN THE ELKONSKY DISTRICT

A. A. Danilov[1], I. D. Glass[1], E. S. Ovcharova[1], V. Y. Fomin[1], A. A. Rudenko[2], V. G. Zuravlev[3], V. A. Domarenko[4]

[1]ООО «ГРП»
Москва, Россия, danilov@utzm.com
[2]АО «РУСБУРМАШ»
Москва, Россия rudall2007@yandex.com
[3]АО «Эльконский ГМК»
Москва, Россия, valgezhuravlev@rosatom.ru
[4]Томский политехнический университет
Томск, Россия, viktor_domarenko@mail.ru

The ores of the Elkonsky district are complex in nature with significant concentrations of free gold, especially in the near-surface part, in connection with which the Elkonsky uranium ore region can be defined as the Elkonsky gold-uranium with a gold potential of at least 500 tons.

Введение

Эльконский урановорудный район является частью Центрально-Алданского горнопромышленного района, представляющего собой наиболее промышленно развитую и экономически освоенную южную часть Республики Саха (Якутии).

Он расположен в пределах одноименного горстового поднятия сложенного глубоко метаморфизованными и сложно дислоцированными архейскими кристаллическими сланцами и гнейсами, ультраметаморфическими и магматическими образованиями раннепротерозойского возраста. По периферии района в виде останцов на размытой поверхности докембрийских пород близгоризонтально залегают осадочные отложения венд-кебрийского возраста. Образования нижнего и верхнего структурных этажей прорваны щелочноземельными и щелочными магматическими породами мезозойского возраста и перекрыты чехлом рыхлых кайнозойских отложений.

Главными структурными элементами района являются региональные разломы архейского заложения, неоднократно подновлявшиеся в более позднее время.

В металлогеническом плане Эльконский урановорудный район, характеризуется проявлением двух главных эпох рудообразования: докембрийской и мезозойской. В докембрийскую эпоху образованы крупные месторождения железа, флогопита и апатита, расположенные по периферии Эльконского горста. Для мезозойской металлогенической эпохи характерны промышленные месторождения урана и золота, месторождения молибдена, а также мелкие полиметаллические проявления жильного типа [3].

Материалы и методы

В основу исследований положены результаты разведки месторождений Зоны Южная и месторождения Северное, выполненной компаниями АО «Русбурмаш», АО УГРК «Уранцветемет», ООО «ГРП» в 2009–2012 гг. и 2018–2020 гг. по заданию недропользователя, АО «Эльконский ГМК», входящего в холдинг АО «Атомредметзолото», Госкорпорации Росатом. Аналитические и технологические исследования выполнялись лабораториями «СЖС Восток Лимитед» (г. Чита), ФГБУ «ВИМС» (г. Москва), АО «ВНИИХТ» (г. Москва), ОХТЗ (г. Краснокаменск) и АО «Иргиредмет» (г. Иркутск).

Результаты и их обсуждение

В пределах Эльконского горста выявлено свыше 20 рудоносных зон, характеризующихся комплексным золото-урановым и молибден-золотоурановым оруденением. Урановое оруденение Эльконского УРР локализовано в долгоживущих разрывных структурах, подновленных в мезозойское время, преимущественно, северо-западного, реже субширотного, простирания (Рис. 1).

В наиболее крупной и изученной рудоносной тектонической зоне Зоне Южная комплексное золотоурановое оруденение образует кулисообразно располагающиеся тела жильной формы протяженностью до 1 км. В целом, протяженность – Зоны Южная составляет 20,7 км, глубина распространения оруденения превышает 2 км. Зона Южная условна разделена на несколько участков, которые рассматриваются как самостоятельные месторождения: Элькон, Эльконское Плато, Курунг, Непроходимое, Дружное и участок Минеевский. Протяженность второй по масштабам оруденения Зоны Северная (месторождение Северное) 4,7 км, оруденение распространяется на глубину 1200–1500 м. Кроме того, в пределах района установлен ряд оперяющих ураноносных структур (Зоны Старая, Знакомая, Ветвистая и др.).

По своей структуре рудоносные Эльконского урановорудного района практически однотипны. Это вытянутые по простиранию и падению маломощные тела с практически сплошным характером оруденения, ориентированные субсогласно с элементами залегания рудовмещающих тектонических зон с обогащенными участками в узлах сочленения с оперяющими нарушениями [2, 4]. Протяженность отдельных рудных тел по простиранию варьирует от 20–30 до 650–700 м, по падению – от 20–30 до 200–300 м при мощности от десятков см до 2–5 м. Наиболее крупные рудные тела обычно имеют склонение в плоскость рудовмещающих зон на СЗ под углами 30–50°. Сближенные рудные тела образуют рудные залежи протяженностью 550–3900 м по простиранию и 400–1500 м по падению.

Верхняя граница промышленных руд проходит, преимущественно, в 200–400 метрах от уровня современной поверхности и только в отдельных случаях, в местах сочленения с оперяющими структурами промышленные руды выходят на поверхность.

Рис. 1. Схематическая геологическая карта Эльконского урановорудного района

1 – интрузии и дайки верхнеюрского магматического комплекса, 2 – платформенные отложения кембрия, 3 – метаморфические и гранитные комплексы архея, 4 – древние тектонические зоны, подновленные и образованные в мезозое, 6 – основные месторождения урана; 1–6 – участки месторождения Южное (Элькон, Эльконское плато, 3 – Курунг, 4 – Непроходимый, 5 – Дружный, 6 – Минеевский)

Первичные руды представлены преимущественно титанатом урана – браннеритом, образующим цемент брекчий, прожилки в пирит-карбонат-полешпатовых метасоматитах (эльконитах) [1]. В состав эльконитов входят тонкозернистый метасоматический скрытокристаллический высокозолотоносный пирит – мельниковит (5–7 %), содержащий около 60–90 г/т тонкодисперсного золота, карбонаты (15–20 %) и агрегат тонкозернистого буроватого калиевого полевого шпата, частично перекристаллизованного в прозрачный адуляр (до 80 %). На юго-восточном фланге Зоны Южная (участок Минеевский) получила развитие молибденовая минерализация, представленная вкраплённостью иордизита и молибденита.

Содержание урана в первичных условно балансовых рудах (по бортовому содержанию 0,04 %) около 0,15 %; в забалансовых рудах (по бортовому содержанию 0,02 %) – 0,045 %. В качестве попутных компонентов в первичных рудах присутствуют золото (~ 0,8 г/т), серебро (до 10 г/т), молибден (до 0,08 %), ванадий (~ 0,05 %).

В приповерхностной части рудоносных зон до глубин 100–150 м первичное оруденение претерпело существенные изменения в результате проявления окислительных процессов. С замещением сульфидов гематитом и лимонитом (6,8–7,5 %) , выщелачиванием карбонатов, формированием биотита, хлорита (наиболее кислотоемких компонентов), гидрослюд, глинистых минералов (13–15 %). Урановая минерализация представлена в основном вторичными минералами: отенитом, торбернитом, ураноцирцитом. Окисление золотоносного пирита приводит к образованию вторичных тонких выделений свободного золота. Нередко встречаются кварцевые жилы, а также прожилки мориона и флюорита.

Содержания золота в варьируют от 0,73 до 5,9 г/т, при забалансовых содержаниях урана – 0,007–0,067 %. Из элементов примесей присутствуют в незначительных количествах мышьяк, ванадий, хром, циркон, ниобий. На месторождении Северное среднее содержание золота в подсчетных блоках варьирует от 0,6 до 1,8 г/т, составляя в среднем по месторождению 0,94 г/т, в единичных пробах до 18 г/т. Среднее содержание попутных компонентов серебра и урана составляет, соответственно 6,2 г/т и 0,017 %.

Окисленные руды месторождения Лунное (зона Федоровская) характеризуются более высокими содержаниями золота – 1,5–4,1 г/т (в среднем по месторождению – 2 г/т) и серебра – 6,6–50,1 г/т (в среднем по месторождению – 9,14 г/т); содержание урана – 0,014 %.

Таким образом, вертикальная зональность месторождений Эльконского УРР проявляется в смене окисленных урансодержащих серебро-золотых руд, полуокисленными, а затем и неокисленными (первичными) золотоурановыми рудами. Для уранового оруденения зональность выглядит следующим образом: урановые слюдки → окислы, силикаты и фосфаты урана → титанат урана. В окисленных рудах золото свободное, а в первичных и, частично, в полуокисленных рудах золото связано с пиритом и недоступно для прямого цианирования (Рис. 2).

В связи с наличием на месторождениях первичных, полуокисленных и окисленных руд большое значение приобретает технологическое картирование. Критериями окисленности руд являются степень окисления, определенная по соотношению в рудах закисного и окисного железа и степень извлечения золота при тестовом выщелачивании цианидными растворами. Из приведённого графика (Рис. 3) видно, что извлечение золота находится в прямой зависимости от степени окисления – при повышении степени окисления проб руды растет извлечение золота цианированием.

Технологические исследования руд месторождений Северное, Зоны Южная проводились с 1980–85 гг. – в период разведки месторождений и продолжались в 2007 г и по 2020 г. включительно в лабораториях АО «ВНИИХТ», ОХТЗ и АО «Иргиредмет». Массы технологических проб составляли от первых кг до 50 т. За этот период была исследована и испытана урановая руда месторождений Зоны Южная (Эльконское плато, Курунг, Непроходимое, Дружное) и золото-серебряная урансодержащая руда месторождения Северное.

На первом этапе технологических исследований упор был сделан на совокупную переработку золото-урановых руд месторождений Зоны Южная. Технология отрабатывалась на стандартной пробе в АО «ВНИИХТ», а в 2009 г. – на крупнообъемной пробе (50 т) на опытном заводе.

По вещественному составу основным рудным минералом во всех месторождениях был определен браннерит и продукты его распада – уранофан, коффинит, отенит и лермонтовит. Выделены три технологических типа руд – окисленные, полуокисленные и первичные руды. Содержания урана в первичных рудах 0,14–0,18 %, в окисленных – в среднем 0,035 %. Содержание кислотоемких минералов колеблется от 9 до 18 %, карбонатов от 4,4 до 10 %, отношение окисного и закисного железа более 2.

При автоклавном выщелачивании в стандартных условиях (t – 140 °C, Po_2 – 3 атм., τ – 4 часа, расход HNO_3 – 1 %) из окисленных руд извлекается 97 % урана при расходе серной кислоты 8 %, из полуокисленных руд – 94,5 % при расходе кислоты 16 %, из неокисленных руд – 81,3 % при расходе кислоты 18 %.

На втором этапе изучение технологических свойств руд проводили на пробах месторождения Северное, отобранных от поверхности до глубины 800 м.

На месторождении Северное руды представлены:

- серебро-золоторудные с забалансовыми содержаниями урана;

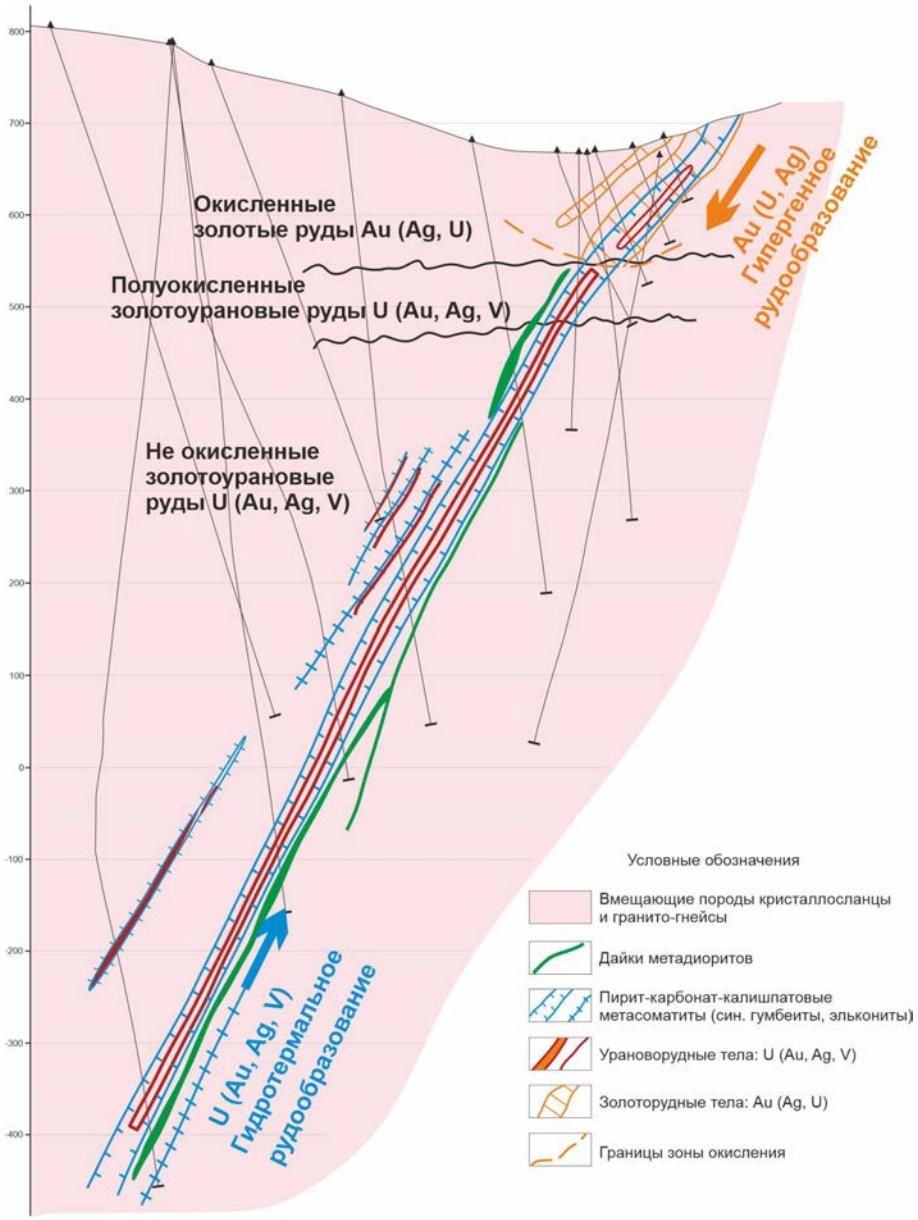


Рис. 2. Геолого-генетическая модель формирования комплексного Au-U оруденения (на основе геологического разреза ПР 76 месторождения Северное)

- золото-урановые.

Золото-серебряные руды относятся к окисленным, а золото-урановые – к полуокисленным и неокисленным (первичным) рудам.

Извлечение урана при атмосферных условиях варьирует от 51 до 93,4 %, и в автоклаве от 76,8 до 97 %.

Кроме урана, золота и серебра в растворах выщелачивания присутствует ванадий, который можно извлекать из продуктивных растворов после сорбции урана, где он содержится в концентрации 150–300 мг/л. Сбросовые растворы окисляются перекисью водорода, после чего проводится сорбция на смоле пятиокиси ванадия. Извлечение ванадия на основе различных опытов составило 36–70 %.

На третьем этапе изучения технологических свойств были исследованы руды окисленной зоны и разработан Регламент на переработку методом кучного выщелачивания (АО «Иргиредмет»). В настоящее время идет строительство опытно-промышленной установки КВ на месторождении Северное.

Сравнительный анализ технологий, испытанных и разработанных на рудах месторождений Зоны Южная и Северная, позволяет сделать вывод, что в современных условиях экономически привлекательной технологии по извлечению урана, золота и попутного серебра не существует за исключением переработки окисленных руд месторождения Северное.

Перспективные направления исследований по добыче и переработке золото-урановых руд месторождений Эльконского урановорудного района.

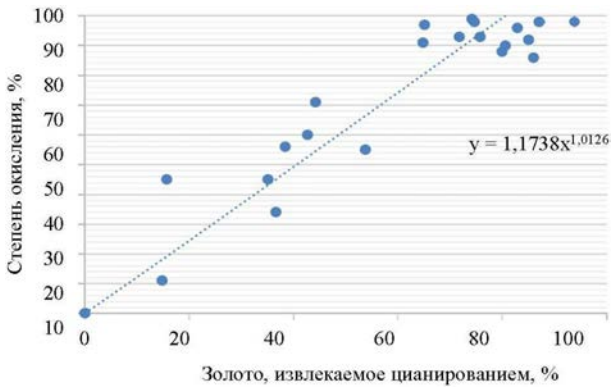


Рис. 3. Зависимость извлечения золота от степени окисления руды

В мире всего эксплуатируется чуть более 300 объектов КВ в разных стадиях работы, с добычей урана, меди, золота, серебра и никеля в качестве основных продуктов и с попутным производством молибдена, цинка и свинца.70 проектов из этого числа работают в зонах с арктическим и субарктическим климатом. Отличительной чертой таких предприятий является работа в условиях мерзлоты, с подогревом штабеля изнутри или с помощью подогрева растворов, уникальные технологические решения в области кинетики выщелачивания, особенно для биологического КВ.

Перспективные направления по исследованию эффективных технологий переработки руд представлены на Рис. 5

Разработка технологии и использование мирового опыта переработки упорных руд применительно к рудам Эльконского УРР видится в развитии вариантов бактериального КВ. Одним из примеров может служит предприятие по бактериальному КВ никеля из сульфидных руд Talvivaara (Финляндия) [5], золота на Олимпиадинсокм месторождении в Красноярском крае [8]. Технологический процесс переработки руд состоит из добычи руд (открытый карьер), дробления, бактериального КВ и переработки продуктивных растворов с извлечением металлов (Ni, Co, Cu, Zn, Au и попутного U).

Мировая практика создала огромный задел в сфере прорывных технологий переработки минерального сырья, который в ходе дальнейшего развития, откроет совершенно новые возможности переработки минерального сырья, причем большая часть ориентирована на принципы «зеленой химии». Создавшаяся ситуация настоятельно требует быстрейшей апробации перспективных технологий на реальных объектах, в том числе и на таком монстре как месторождения Эльконского урановорудного района, освоение которого станет очередным прорывным шагом в освоении минерально-сырьевой базы РФ.

Выводы

1. К основному типу месторождений, выявленных на Эльконском горсте, относятся золото-урановые. Эти месторождения связаны с древними, долгоживущими, подновленными в мезозое рудоносными тектоническими структурами. Первичное урановое оруденение развито на глубинах от 200 до 2000 м. Попутными компонентами урановых руд являются золото, серебро, молибден и ванадий. Вследствие неблагоприятной конъюнктуры рынка урана, отсутствия инфраструктуры, глубокого залегания рудных тел, относительно низкого содержания урана в упорных трудноизвлекаемых рудах перспективы освоения урановых месторождений Зоны Южная в обозримом будущем отрицательные. В связи с этим в настоящее время, несмотря на значительный потенциал, оценку и разведку объектов Эльконского УРР на уран проводить нецелесообразно.

2. В зоне полуокисленных пород, развитых на глубинах 100–200 м от поверхности, и флангах основных золоторудных тел, более широкое развитие имеют окислы, силикаты и фосфаты урана – настуран, коффинит, лермонтовит и др. Полуокисленные урановые руды могут перерабатываться попутно с окисленными, с извлечением урана при атмосферном выщелачивании

3. В настоящее время практический интерес могут представлять золоторудные объекты, с попутными серебром и ураном, с хорошо проявленной зоной окисления, пригодных для открытой добычи с применением кучного,в том числе бактериального выщелачивания золота, что успешно осуществляется на месторождении Лунное.

4. Учитывая что руды Эльконского района носят комплексный характер со значительными концентрациями свободного золота особенно в приповерхностной части, Эльконский урановорудный район может быть определен как Эльконский золото-урановый рудный район с потенциалом золота, доступного для открытой добычи, не менее 500 тонн.

Рекомендации

1. Провести крупномасштабные поисковые работы и предварительно оценить перспективы ранее выявленных урановорудных зон Эльконского УРР на золотое оруденения в зоне окисления с составлением прогнозной карты золотоносности Эльконского УРР;

2. На месторождениях Зоны Южная (Элькон, Непроходимое, Дружное), выполнить специализированные работы по изучению внутреннего строения рудовмещающих структур и характера распределения в них полезных компонентов, в том числе золота. молибдена, рения, серебра, редких земель, МПГ;

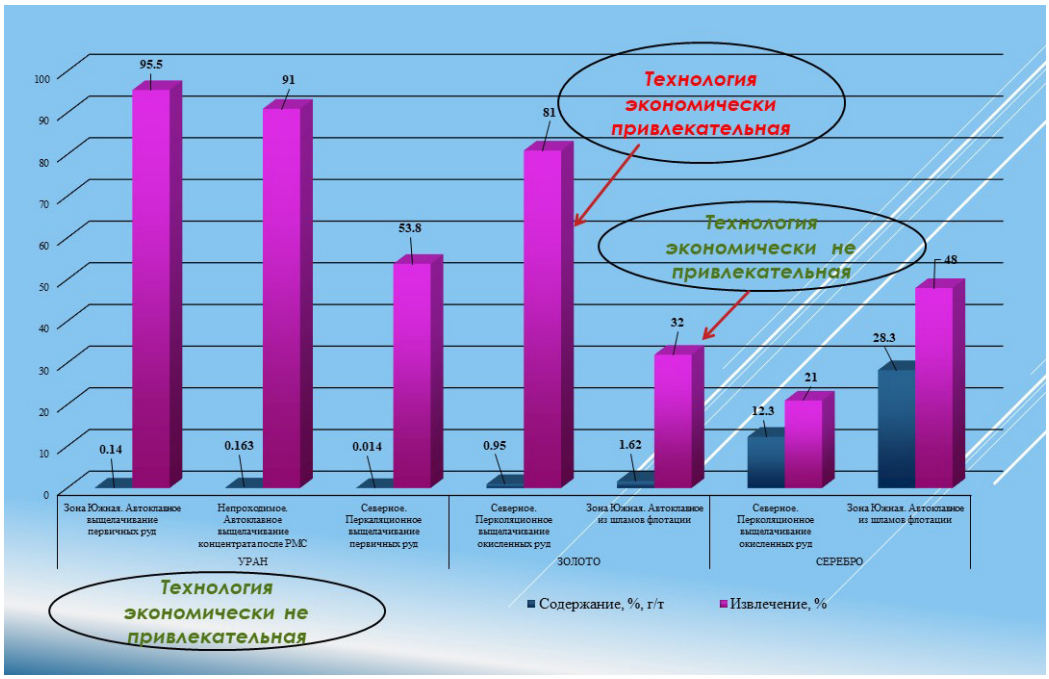


Рис. 4. Привлекательность разработанных технологий переработки руд Эльконского УРР

Рис. 5. Прорывные технологии переработки минерального сырья [7]

3. Провести работы по определению контуров золотосодержащих руд за пределами контуров подсчета балансовых запасов урана и решить вопрос о целесообразности их учета и отработки.

4. При оценке и разведке месторождений выполнять геолого-технологическое картирование с целью выделения типов и сортов руд: окисленных серебро-золотых урансодержащих, полуокисленных и первичных золото-урановых.

5. Провести технологические испытания руд оцениваемых месторождений по кучному выщелачиванию золота и урана, в том числе с применением технологий по бактериальному КВ урана из полуокисленных руд.

6. Всесторонне проработать вопрос, касающийся стадийности отработки запасов, предусмотреть возможность вовлечения в первоочередную отработку запасов, обеспечивающих максимальный экономический эффект

Литература

1. Бойцов В. Е., Пилипенко Г. Н., Дорожкина Л. А. Новый уникальный тип золото-урановых (бранneритовых) руд Эльконского рудного узла. RMS DPI 2006-2-6-0.
2. Домаренко В. А., Зайченко А. П. Особенности строения рудовмещающей структуры комплексного золото-уранового месторождения Северное (Эльконский рудный район, Южная Якутия) // Разведка и охрана недр, 2015. – № 7. – С. 7–11.
3. Живов В. Л., Бойцов А. В., Шумилин М. В. Уран: геология, добыча, экономика. – М.: РИС «ВИМС», 2012. – 304 с.

4. Зайченко А. П., Домаренко В. А., Перегудина Е. В. Внутреннее строение рудовмещающей структуры комплексного золотоуранового месторождения Северное (Эльконский урановорудный район) // Известия ТПУ, 2015. – № 9. – С. 78–84.
5. Лодейщиков В. В., Переработка никельсодержащих руд методом кучного бактериального выщелачивания. Опыт финской фирмы «Talvivaara», Золотодобыча, № 132, Ноябрь, 2009.
6. Терехов А. В., Молчанов А. В., Шатова Н. В., Белова В. Н. Два типа рудоносных гумбеитов Эльконского золото-урановорудного узла (южная Якутия) // Региональная геология и металлогения, 2014. – № 60. – С. 71–86.
7. Прорывные гидрометаллургические процессы для устойчивого развития технологий переработки минерального сырья. ВИМС. М. 2019.
8. https://zolteh.ru/technology_equipment/razrabotka-tehnologii-avtoklavnoj-pererabotki-kontsentratov-i-promproduktov-olimpiadinskogo-goka-zao-polyus/.

ПЕРОВСКИТЫ КОЧУМДЕКСКОГО КОНТАКТОВОГО ОРЕОЛА (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ): ПЕРВЫЙ ОПЫТ U-Pb ДАТИРОВАНИЯ МЕТОДОМ LA-ICP-MS

А. С. Девятиярова[1], В. С. Каменецкий[2], Э. В. Сокол[1], С. Н. Кох[1], Е. Н. Нигматулина[1]

[1]Институт геологии и минералогии СО РАН
Новосибирск, 630090 Россия
[2]Институт экспериментальной минералогии РАН
Черноголовка, 142432, Россия, devyatiyarova@igm.nsc.ru

PEROVSKITE FROM THE KOCHUMDEK CONTACT AUREOLE IN EAST SIBERIA: APPLICABILITY TO THE LA-ICP-MS U-Pb GEOCHRONOLOGY (FIRST EXPERIENCE)

A. S. Deviatiiarova[1], V. S. Kamenetsky[2], E. V. Sokol[1], S. N. Kokh[1], E. N. Nigmatulina[1]

[1]V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
Novosibirsk, Russia
[2]Institute of Experimental Mineralogy RAS
Chernogolovka, Russia, devyatiyarova@igm.nsc.ru

Perovskite is the main accessory mineral in the spurrite marbles of the Kochumdek aureole. Abundant and chemically homogeneous perovskite crystals (5–200 μm) are characterized by limited substitutions: $Ti^{4+} \rightarrow Zr^{4+}$ (up to 2.4 mol. % $CaZrO_3$) and $Ca^{2+}\,Ti^{4+} \rightarrow REE^{3+}\,Fe^{3+}$ (up to 1.5 mol. % $REEFeO_3$). Perovskite is the main host for Th, U, Ti, Zr, and LREE (La + Ce + Pr + Nd) and has element incorporation ratios as high as K_{Th} = 487–666; K_U = 374; K_{Ti} = 179–267; K_{Zr} = 35–52; K_{REE} = 36–79. U–Pb isotopic ages for the Kochumdek perovskite were obtained by in situ U-Pb LA-ICP-MS isotope analyses. In total ≈ 60 grains of metamorphic perovskite from 2 samples were analyzed and the following U–Pb ages of the metamorphic event were obtained: 248.0 ± 7.2 Ma and 258.0 ± 6.0 Ma (the intersection of sets is 252–255 Ma).

Введение

Перовскит ($CaTiO_3$, Pnma) – распространенный акцессорный минерал многих SiO_2-недосыщенных магматических пород (кимберлитов, лампрофиров, нефелиновых сиенитов, карбонатитов) [8, 12, 15], обычен также и для пород контактового метаморфизма (скарнов и мраморов) [4, 15]. Перовскитовая структура ($A^{[12]}B^{[8]}X_3$, где A^{2+} = Ca, Sr, Ba, Na, REE; B^{4+} = Ti, Sn, Nb, Ta, Zr, Th, U, Fe^{3+}, Al, Mg; X^2 = O, F), уникальная по своей «пластичности», способна в различных сочетаниях включать десятки элементов и толерантна к появлению дефицита/избытка кислорода [11]. Природный перовскит концентрирует рассеянные, редкоземельные и высокозарядные элементы (главным образом, Nb, Ta, Ce, La, Th и U), благодаря чему он (наряду с цирконом и бадделеитом) пригоден для U–Pb изотопного датирования геологических процессов методами SHRIMP и LA-ICP-MS. Первый из этих методов дорог и имеет малую производительность, однако обеспечивает высокую точность U–Pb датировок [3]. Второй метод – значительно более дешев и производителен, однако обладает высокой точностью только при датировании минералов с низкими содержаниями «обычного» (common) свинца [2, 12]. В настоящее время методика U–Pb датирования методом LA-ICP-MS перовскитов из ультраосновных и щелочных магматических пород успешно используется для определения возраста соответствующих комплексов [2, 8–10, 12, 13].

Цели данной работы: (1) охарактеризовать макро- и микроэлементный состав перовскитов из мра-

моров Кочумдекского ореола, содержащих < 2,2 ppm U; (2) определить уровни накопления перовскитами U, Th и Pb; (4) выполнить их U–Pb изотопное датирование методом LA-ICP-MS и оценить соответствующие ошибки; (5) дать заключение о применимости метода LA-ICP-MS для датирования перовскитов из метакарбонатных метаморфических пород, бедных ураном.

Фактический материал и методы исследования

Двадцать пять образцов мраморов были охарактеризованы в лабораториях ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Скрининг коллекции (анализ морфологии и состава перовскитов, выбор образцов с крупными зернами и повышенными содержаниями в них примесей) был проведен электронно-зондовым методом на сканирующем микроскопе MIRA3-LMU (TESCAN ORSAY Holding) с системой микроанализа AZtec Energy Xmax-50+. Затем на микроанализаторах JXA-8100 и JXA-8230 был определен макрокомпонентный и примесный состав перовскитов. Диаметр зонда составил 2 мкм. Были использованы следующие эталоны: волластонит (Si, Ca), диопсид (Mg), гранат «IGEM» (Fe, Mn), альбит (Na), рутил «Gf-55» (Ti), циркон (Zr), Sr-стекло «Gl-10» (Sr), V_2O_5 (V), Nb-металл (Nb), Ta_2O_5 (Ta), UO_2 (U), ThO_2 (Th), $Y_3Al_5O_{12}$ (Y, Al), $LiCe(WO_4)_2$ (Ce), $KLa(MoO_4)_2$ (La), $CsPr(MoO_4)_2$ (Pr), $RbNd(MoO_4)_2$ (Nd). Пределы обнаружения элементов (по критерию 3σ, в мас. %): 0,03 – MgO, CaO, MnO, FeO; 0,04 – TiO_2; 0,06 – SiO_2, Al_2O_3, Na_2O, SrO, ThO_2, UO_2, Ce_2O_3, La_2O_3, Ta_2O_5, V_2O_3; 0,07 – Nb_2O_5; 0,09 – ZrO_2, Y_2O_3; 0,12 – Nd_2O_3, Pr_2O_3. Для U-Pb датирования были выбраны образцы РТ-117 и РТ-122 с крупными (50–150 мкм) зернами перовскита, содержащими U ($X_{ср.}$ = 361 и 40 ppm, соответственно) и Th ($X_{ср.}$ = 646 и 403 ppm, соответственно). Определения содержаний ^{56}Fe, ^{90}Zr, ^{140}Ce, ^{202}Hg, ^{204}Pb, ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb, ^{232}Th, ^{238}U и геохронологические U-Pb исследования 60 зерен перовскитов были выполнены методом LA-ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 4500 в Центральной научной лаборатории Университета Тасмании (г. Хобарт, Австралия). Методические детали даны [12]. В тексте использованы сокращения названий минералов: Bgd – багдадит, Cal – кальцит, Djer – джерфишерит, Mtc – монтичеллит, Mw – мервинит, Po – пирротин, Prv – перовскит, Rasv – расвумит, Spu – спуррит, Tly – тиллеит, Wo – волластонит.

Краткие сведения о породах Кочумдекского контактового ореола

Кочумдекский ореол расположен на правом берегу р. Кочумдек (В. Сибирь, 62°27'54.59" с.ш., 91°55'42.99" в.д.); приурочен к верхнему контакту траппа кузьмовского комплекса ($v\beta T_1 kz$) и осадков нижнекочумдекской подсвиты ($S_1 kč + rs$). Температуры образования трёх метаморфических зон составляют: 1) мервинитовая – T ≥ 900 °C; 2) спурритовая – T ≥ 750 °C; 3) волластонитовая – T ≥ 700 °C; давление нагрузки – 200 бар [4–6]. Мраморы возникли по мергелистым известнякам, в составе которых преобладает кальцит. Доля глинистого материала в мергелистых прослоях варьирует от 7 % до 47 %, доля песчаной фракции < 1 % [7]. В тяжелой фракции доминируют аутигенные сульфиды Fe и лимонит; терригенные минералы: ильменит, лейкоксен, рутил, брукит, анатаз, циркон, гранат, турмалин, эпидот. Мергелистые известняки и мраморы бедны TiO_2 (≤ 0,35 мас. %); обладают умеренными содержаниями Zr (8,69–135 ppm) и LREE (La + Ce + Pr + Nd – 11,2–80,0 ppm) и низкими (в ppm): Pb (0,44–9,13), Nb (0,96–6,75), Hf (0,20–3,16), Th (0,01–4,65) и U (0,41–2,16). Габброиды из кровли Кочумдекского траппа содержат сопоставимые концентрации (в ppm): LREE (La + Ce + Pr + Nd – 26,6–72,7); Pb (2,20–10,8), Nb (2,68–8,15), Hf (1,87–5,29), несколько беднее Th (0,48–1,56) и U (0,23–0,68), но богаче TiO_2 (1,13–1,93 мас. %) и Zr (66–196 ppm). Мраморы – свежие, крупнозернистые (0,5–5 мм), грубополосчатые породы. Силикатные прослои, состоящие из спуррита, геленитового мелилита, мервинита и монтичеллита, содержат обильный перовскит и зерна сульфидов Fe, K, Zn, Mn, Pb и Ag. Кальцитовые прослои содержат только мелкие зерна мелилита и перовскита [14].

Состав перовскитов из мраморов Кочумдекского ореола

Перовскит – главный акцессорный минерал кочумдекских мраморов – образует в них неравномерную вкрапленность изометричных зерен, псевдооктаэдрических и псевдокубических кристаллов (от 5–10 до 40–50 мкм). Минерал зачастую приурочен к границам зерен породообразующих минералов, где образует сростки с багдадитом, сульфидами и магнетитом. Скопления мелких зерен перовскита (5–10 мкм) характерны для спуррит-монтичеллитовых симплектитов, замещающих мервинит. Реже он образует включения в мелилите, мервините, кальците, спуррите и волластоните. Вблизи контакта с траппом кристаллы перовскита укрупняются (до 150–200 мкм), становясь пойкилитовыми с включениями кальцита, спуррита и мелилита.

Состав кочумдекских перовскитов близок к теоретическому (97,1–99,8 мол. % $CaTiO_3$) (таблица 1). Постоянно присутствуют примеси (в мас. %): Fe_2O_3 = 0,42–2,56; SiO_2 = 0,10–2,37; Al_2O_3 = 0,15–2,55. Концентрации $(La + Ce + Nd + Pr)_2O_3$ низкие (0,12–1,70 мас. %); преобладает Ce_2O_3 (0,12–0,76 мас. %). В ассоциации с K-Fe сульфидами и багдадитом перовскиты содержат V_2O_3 (до 0,72 мас. %). Количества MnO (< 0,03 мас. %), Na_2O и SrO (< 0,06 мас. %) – ниже пределов их обнаружения. Для перовскитов из кочумдекских мраморов главным образом характерны

ограниченные изовалентное $Ti^{4+} \rightarrow Zr^{4+}$ (ряд $CaTiO_3$–$CaZrO_3$) и гетеровалентное $Ca^{2+}\,Ti^{4+} \rightarrow REE^{3+}\,Fe^{3+}$ (ряд $CaTiO_3$–$REEFeO_3$) замещения (рис. 1 А).

Минимальные содержания примесей присущи перовскитам из **Wo-Tly мраморов** (98,4–99,8 мол. % $CaTiO_3$). Они лишь изредка содержат Cr_2O_3 до 1,04 мас. %, ZrO_2 до 0,40 мас. % и Nb_2O_5 до 0,30 мас. %; содержание $(La + Ce + Nd + Pr)_2O_3$ < 1,33 мас. %. В единичных зернах обнаружен ThO_2 (до 0,25 мас. %). Концентрации UO_2 неизменно ниже предела его обнаружения (< 0,06 мас. %). Для перовскитов из **Spu-Mtc ассоциаций** (97,1–99,4 мол. % $CaTiO_3$) характерно присутствие ZrO_2 (0,12–1,95 мас. %) и содержание $(La + Ce + Nd + Pr)_2O_3$ < 0,85 мас. %. Примеси Nb_2O_5 и ThO_2 (до 0,20 мас. %), а также Y_2O_3 (до 0,12 мас. %) отмечается редко. Концентрации Pr_2O_3 (< 0,12 мас. %) и UO_2 (< 0,06 мас. %) не превышают пределов их обнаружения. Поэтому перовскиты из мраморов данного уровня метаморфизма не использовались для U–Pb датирования.

Перовскиты из наиболее высокотемпературных **Spu-Mw мраморов** (97,9–99,5 мол. % $CaTiO_3$) спорадически обладают повышенными концентрациями (в мас. %): ZrO_2 (до 2,08), $(La + Ce + Nd + Pr)_2O_3$ (до 1,70), ThO_2 (до 0,57), Nb_2O_5 (до 0,42) и UO_2 (до 0,37). В них доли миналов $CaZrO_3$ (до 2,40 мол. %) и $REEFeO_3$ (до 1,50 мол. %) максимальны (рис. 1 А). Крупные зерна перовскитов обычно однородны, лишь изредка на BSE-снимках их ядра выглядят более светлыми, выявляя присутствие тяжелых элементов (REE, U, Th). При этом на площади одного шлифа отдельные группы зерен перовскитов могут значимо различаться по содержанию элементов-примесей. Эта особенность, вероятнее всего, является следствием неравномерного распределения в осадочном протолите мраморов минералов тяжелой фракции (ильменита, лейкоксена, рутила, брукита, анатаза, циркона, граната, эпидота), за счет ресурса которых и возникали метаморфические акцессорные Ti и Zr минералы.

По данным LA-ICP-MS анализа, валовые составы зерен перовскита из обр. РТ-117 (98,5–98,7 мол. % $CaTiO_3$) отличает стабильный уровень содержаний (в ppm): Fe (8449–11482, $X_{ср.}$ = 9934; n = 13); Zr (837–1769; $X_{ср.}$ = 1201); Ce (6172–8206; $X_{ср.}$ = 7095), U (327–417; $X_{ср.}$ = 361) и Pb_{total} (21,8–39,7; $X_{ср.}$ = 27,5). Концентрации Th в них разнятся в ≈ 5 раз (368–1367 ppm; $X_{ср.}$ = 646 ppm). Среднее Th/U отношение достаточно низкое – 1,84 (диапазон – 0,77–3,33). Перовскиты из обр. РТ-122 в целом беднее примесями (98,7–99,5 мол. % $CaTiO_3$). Микроэлементный состав отдельных зерен (и их кластеров) при этом существенно разнится (в ppm): Fe (4320–13146, $X_{ср.}$ = 9365; n = 47); Zr (84,0–5099; $X_{ср.}$ = 785); Ce (984–8817; $X_{ср.}$ = 3577), U (9,09–254; $X_{ср.}$ = 40,3) и Pb_{total} (3,90–27,5; $X_{ср.}$ = 12,0), количество Th варьирует в 16 раз (92,9–1522 ppm; $X_{ср.}$ = 403 ppm). Среднее Th/U отношение для перовскитов из этого образца высокое – 14,6 (диапазон – 1,04–35,2).

U-Pb геохронологические исследования перовскита и возраст метаморфического события, связанного с внедрением траппов Кузьмовского комплекса

Для индивидуальных крупных зерен перовскита из образцов РТ-117 (13 шт.) и РТ-122 (47 шт.) были измерены концентрации изотопов ^{202}Hg, ^{204}Pb, ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb, ^{232}Th и ^{238}U. Валовые содержания U в этих породах сопоставимы – 1,00 и 1,19 ppm, соответственно; Pb < 0,5 ppm. При определении возраста фанерозойских объектов по минералам с низкими содержаниями U, предпочтение отдается отношению $^{206}Pb/^{238}U$, ввиду малого содержания радиогенного изотопа ^{207}Pb и обусловленных этим ошибок определения $^{207}Pb/^{206}Pb$ [10]. Предварительно для каждого из анализов перовскита была выполнена коррекция $^{207}Pb/^{206}Pb$ отношений и затем на основе оптимизиро-

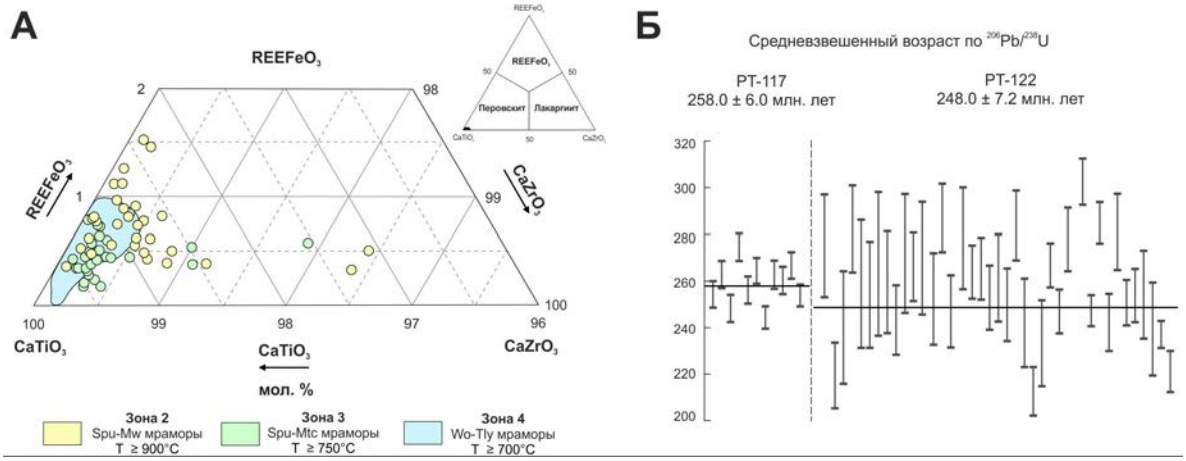
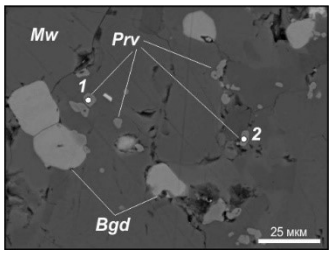
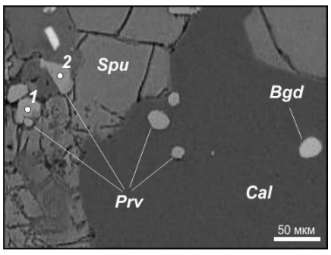
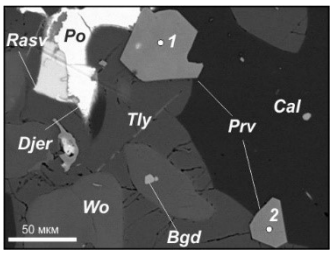


Рис. 1. А – составы перовскитов из Кочумдекских мраморов в координатах $CaTiO_3$–$REEFeO_3$–$CaZrO_3$ (мол. %), по данным рентгеноспектрального микроанализа. Б – разброс значений U-Pb датировок перовскитов из Кочумдекских мраморов, по данным LA-ICP-MS

ванных значений рассчитаны абсолютные возраста индивидуальных зерен. Присутствие в газе-носителе контаминанта ^{204}Hg контролировалось по количеству изотопа ^{202}Hg, которое не превышало 96 отсчетов (cps), в 50 % анализов эта величина равна 0, а в 25 % анализов < 30 cps ($^{204}Hg/^{202}Hg$ = 0,229883). Расчет возраста перовскитов был выполнен с использованием изотопа ^{207}Pb вместо изотопа ^{204}Pb. На основе данных LA-ICP-MS были получены следующие значения абсолютных возрастов перовскита из мраморов Кочумдекского ореола: обр. РТ-122 – 248,0 ± 7,2 млн. лет (95 % доверительный интервал, n = 47) и обр. РТ-117 – 258,0 ± 6,0 млн. лет (95 % доверительный интервал, n = 13) (рис. 1 Б). Область пересечения множеств – интервал 252–255 млн. лет.

На сегодня методами K/Ar, $^{40}Ar/^{39}Ar$ датирования слюд, плагиоклазов и валовых проб лав, а также U-Pb (SHRIMP) датирования циркона и бадделеита установлено, что магматическая активность, обусловленная деятельностью Сибирского суперплюма, длилась в общей сложности около 20 млн. лет. Ее главные пики пришлись на интервалы (254) 251–248, 245–235 и ~ 229 млн. лет, а извержения основного объема магм произошли на границе перми и триаса (~ 252 млн. лет по U-Pb методу и ~ 249 млн. лет по K/Ar, $^{40}Ar/^{39}Ar$ методам) [3]. На западной окраине Тунгусской синеклизы первой фазе базитового магматизма соответствуют именно кузьмовские траппы, эпизод внедрения которых относят к пермо-триассовой границе [1]. Область пересечения множеств $^{206}Pb/^{238}U$ датировок перовскита из мраморов Кочумдекского

Таблица 1. Представительные анализы перовскитов из мраморов Кочумдекского контактового ореола, по данным рентгеноспектрального микроанализа (в мас. %)

Тип породы	Spu-Mw мраморы зона 2, T ≥ 900 °C образец РТ-100				Spu-Mtc мраморы зона 3, T ≥ 750 °C образец РТ-94				Wo-Tly мраморы зона 4, T ≥ 700 °C образец РК-17-12-1			
BSE-фото в отраженных электронах												
Точка	1 #	2 #	*	*	1 #	2 #	*	*	1 #	2 #	*	*
SiO_2	< 0,06	0,08	0,13	0,09	< 0,06	0,07	< 0,06	0,21	< 0,06	< 0,06	0,24	0,09
TiO_2	56,41	54,86	56,16	55,59	56,43	56,74	56,56	56,31	55,11	55,68	55,06	54,80
Fe_2O_3	1,13	1,31	1,03	1,21	1,25	0,70	0,85	0,90	1,73	1,24	1,24	0,91
V_2O_3	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	0,15	0,17	0,17	0,17	< 0,06	0,08	0,08	0,18
CaO	41,66	40,87	41,68	41,32	41,82	41,91	41,77	41,88	41,43	41,68	41,33	41,86
Ce_2O_3	0,52	0,64	0,58	0,49	0,27	0,43	0,30	0,20	0,53	0,40	0,44	0,47
La_2O_3	0,17	0,24	0,22	0,23	< 0,06	0,17	0,09	0,09	0,17	0,21	0,20	0,16
Nd_2O_3	0,25	0,40	0,30	0,27	< 0,12	0,25	0,14	< 0,12	0,20	0,25	0,22	0,22
$\sum REE_2O_3$	0,95	1,28	1,10	0,99	0,27	0,85	0,54	0,29	0,90	0,86	0,86	0,84
ThO_2	0,16	0,57	0,09	0,14	0,17	0,19	0,07	0,08	< 0,06	< 0,06	0,23	< 0,06
UO_2	0,15	0,32	0,26	0,17	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06
Nb_2O_5	0,17	0,42	0,21	0,11	0,08	0,18	0,12	0,13	<0,07	<0,07	0,12	<0,07
ZrO_2	0,24	< 0,09	0,13	0,31	< 0,09	< 0,09	0,23	0,47	< 0,09	< 0,09	0,16	0,30
Сумма	100,84	99,72	100,80	99,91	100,17	100,82	100,31	100,44	99,18	99,54	99,32	99,08
Мол. %												
$CaTiO_3$	98,85	98,75	98,74	98,74	99,58	99,22	99,24	99,04	99,24	99,32	99,02	98,99
$CaZrO_3$	0,27	–	0,15	0,35	–	–	0,26	0,53	–	–	0,19	0,35
$REEFeO_3$	0,88	1,25	1,11	0,91	0,42	0,78	0,49	0,43	0,75	0,68	0,79	0,66

Содержания Ta_2O_5 (< 0,06 мас. %), Y_2O_3 (< 0,09 мас. %) и Pr_2O_3 (< 0,12 мас. %) ниже предела обнаружения; железо рассчитано как Fe_2O_3; анализы перовскита в ассоциации: # – с багдадитом, * – без багдадита.

ореола (с учетом ошибок определения средних величин) соответствует интервалу 252–255 млн. лет, что согласуется как с имеющимся массивом изотопных датировок траппов Тунгусской синеклизы, так и с геологическими наблюдениями, указывающими на раннетриасовый возраст траппов кузьмовского комплекса.

Заключение

Мраморы Кочумдекского контактового ореола, возникшие по шельфовым мергелисто-карбонатным осадкам, отличаются низкими содержаниями Ti, U, Th, Zr и REE; беден этими элементами и Кочумдекский трапп [14]. Однако присутствие в мраморах перовскита, избирательно концентрирующего Ti, U и Th, сделало возможным определение возраста метаморфического события посредством U-Pb датирования этого минерала методом LA-ICP-MS. Ранее А. Шахмурадян с соавторами [8], анализируя особенности фракционирования элементов перовскитами из кимберлитов, отнесли LREE, MREE, Th, U, Ti, Nb и Ta к категории «сильно совместимых», $D_X > 5$. Коэффициенты накопления Th и U в перовскитах Кочумдека превосходят эту величину на 2 порядка: $K_{Th} = [Th_{Prv}/Th_{порода}]$ в перовскитах составили 487, 504 и 666, для мраморов 2, 3, 4 зон соответственно. Для урана величина $K_U = 374$ (зона 2), титана – $K_{Ti} = 179–267$, для Zr и REE соответствующие коэффициенты на порядок ниже: $K_{Zr} = 35–52$; $K_{REE} = 36–79$.

U-Pb геохронологические исследования перовскитов из мраморов на р. Кочумдек впервые позволили определить наиболее вероятный возрастной интервал контактового метаморфизма (252–255 млн. лет) и подтвердили его связь именно с раннетриассовым этапом траппового магматизма. Образование мраморов в ходе стремительного процесса внедрения и остывания базитовой магмы [6] является благоприятной предпосылкой для корректного определения возраста термического события по индивидуальным LA-ICP-MS анализам перовскитов [10]. Важно также отметить высокую степень сохранности единственной генерации метаморфических перовскитов. В отличие от ассоциаций щелочных пород, их метасоматических производных и/или скарнов, перовскит из Spu-Mw мраморов гомогенен, не имеет признаков перекристаллизации или замещения.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что перовскит является благоприятным объектом для U-Pb датирования бедных U метакарбонатных пород из комплексов контактового метаморфизма. Минерал образует многочисленные, достаточно крупные зерна единственной генерации, зачастую однороден по составу, обладает способностью селективно аккумулировать уран. Повышение точности U-Pb датировок перовскитов методом LA-ICP-MS и минимизация ошибок определения возраста термального события (в настоящей работе они составили 2,9 % и 2,3 % для индивидуальных образцов) может быть достигнута за счет набора статистики определений $^{206}Pb/^{238}U$ отношений.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00216.

Литература

1. Альмухамедов А. И. $^{87}Sr/^{86}Sr$ изотопия пермотриасовых базальтов Сибирской платформы и вероятные источники вещества при внутриплитовом магматизме / А. И. Альмухамедов, Г. С. Плюснин, Е. А. Альмухамедов, В. В. Золотухин, В. М. Николаев, С. В. Кузнецова, Г. П. Сандимирова // Геология и геофизика, 1992. – Т. 33. – № 7. – С. 48–60.
2. Арзамасцев А. А. U-Pb геохронология и изотопная (Sr, Nd) систематика минералов щелочно-ультраосновных массивов Кольской провинции / А. А. Арзамасцев, Фу-Ян Ву // Петрология, 2014. – Т. 22. – №. 5. – С. 496–496.
3. Гусев Н. И. U-Pb возраст, геохимия и Lu-Hf систематика циркона из интрузивных траппов западной части Тунгусской синеклизы Сибирской платформы / Н. И. Гусев, Л. Ю. Сергеева, Т. С. Строев, С. О. Савельев, А. Г. Шарипов, А. Н. Ларионов, С. Г. Скублов // Региональная геология и металлогения, 2019. – Т. 79 – С. 49–67.
4. Перцев Н. Н. Высокотемпературный метаморфизм и метасоматоз карбонатных пород / Н. Н. Перцев. – М.: Наука, 1977. – 256 с.
5. Ревердатто В. В. Фации контактового метаморфизма / В. В. Ревердатто. – М.: Недра, 1970. – 271 с.
6. Сокол Э. В. Контактовый метаморфизм на р. Кочумдек (бассейн р. Подкаменной Тунгуски): свидетельства существования течения расплава / Э. В. Сокол, О. П. Полянский, А. Н. Семенов, В. В. Ревердатто, С. Н. Кох, А. С. Девятиярова, В. Ю. Колобов, П. В. Хворов, А. В. Бабичев // Геология и геофизика, 2019. – № 4. – С. 456–471.
7. Тесаков Ю. И. О валидности силурийских свит, выделенных на северо-западе Сибирской платформы по материалам промысловой геофизики/ Ю. И. Тесаков // Новости палеонтологии и стратиграфии: Приложение к журналу Геология и геофизика, 2014. – Т. 55. – № 19. – С. 5–37.
8. Chakhmouradian A.R. Trace-element partitioning in perovskite: implications for the geochemistry of kimberlites and other mantle-derived undersaturated rocks / A.R. Chakhmouradian, E.P. Reguir, V.S. Kamenetsky, V.V. Sharygin, A.V. Golovin // Chemical Geology. – 2013. – V. 353. – P. 112-131.

9. Chen W. Evidence for the multi-stage petrogenetic history of the Oka carbonatite complex (Québec, Canada) as recorded by perovskite and apatite/ W. Chen, A. Simonetti // Minerals, 2014. – V. 4 (2). – P. 437–476.
10. Cox R. A. U-Pb dating of perovskite by LA-ICP-MS: an example from the Oka carbonatite, Quebec, Canada / R. A. Cox, D. H. Wilton // Chemical Geology, 2006. – V. 235 (1–2). – P. 21–32.
11. Mitchell R. H. Nomenclature of the perovskite supergroup: A hierarchical system of classification based on crystal structure and composition / R. H. Mitchell, M. D. Welch, A. R. Chakhmouradian // Mineralogical Magazine, 2017. – V. 81 (3). – P. 411–461.
12. Potter N. J. Textural evolution of perovskite in the Afrikanda alkaline–ultramafic complex, Kola Peninsula, Russia / N. J. Potter, M. R. Ferguson, V. S. Kamenetsky, A. R. Chakhmouradian, V. V. Sharygin, J. M. Thompson, K. Goemann // Contributions to Mineralogy and Petrology, 2018. – V. 173 (12). – P. 1–20.
13. Putiš M. U/Pb LA-ICP-MS age of metamorphic–metasomatic perovskite from serpentinized harzburgite in the Meliata Unit at Dobšiná, Slovakia: Time constraint of fluid-rock interaction in an accretionary wedge / M. Putiš, Y. H. Yang, M. Koppa, M. Dyda, P. Šmál // Acta Geologica Slovaca, 2015. – V. 7 (1). – P. 63–71.
14. Sokol E. V. Sulfide minerals as potential tracers of isochemical processes in contact metamorphism: case study of the Kochumdek aureole, East Siberia / E. V. Sokol, A. S. Deviatiiarova, S. N. Kokh, V. N. Reutsky, A. Abersteiner, K. A. Philippova, D. A. Artemyev // Minerals, 2021. – V. 11 (1). – P. 17.
15. Uher P. Perovskite from Ca-Mg skarn-porphyry deposit Vysoká Zlatno, Štiavnica stratovolcano, Slovakia / P. Uher, P. Koděra, T. Vaculovič // Mineralia Slovaca, 2011. – V. 43 (3). – P. 247–254.

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ПОСТУПЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ р. ЕНИСЕЙ

Д. В. Дементьев, А. Я. Болсуновский, В. И. Вахрушев, С. В. Косиненко

Институт биофизикиСО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН
Красноярск, Россия, dementyev@gmail.com

RETROSPECTIVE ANALYSIS OF THE ENTRANCE OF ARTIFICIAL RADIONUCLIDES INTO BOTTOM SEDIMENTS OF THE YENISEI RIVER

D. V. Dementyev, A. Ya. Bolsunovsky, V. I. Vakhrushev, S. V. Kosinenko

Institute of Biophysics SB RAS, FRC KSC SB RAS
Krasnoyarsk, Russia, dementyev@gmail.com

In the bottom sediments of the Yenisei River sampled at different distances along the river from the discharge point of the MCC "Rosatom" (Krasnoyarsk Territory) layers with anomalous content of ^{137}Cs (up to 26000 Bq/kg) were found. Analysis of the isotopic ratios of radionuclides (^{137}Cs/^{152}Eu and ^{137}Cs/^{60}Co) in samples of anomalous layers from different regions along the river and the calculated dating of cores using sedimentation rates indicate that layers of anomalous ^{137}Cs content can be considered a consequence of extreme floods in 1966 and 1988.

Введение

С середины XX века одна из самых длинных и полноводных рек мира – река Енисей подвержена радиационному загрязнению техногенными радионуклидами как в результате глобальных выпадений, так и деятельности ГХК «Росатома» в г. Железногорске (Красноярский край) [4]. Основной вклад в радиационное загрязнение р. Енисей вносили сбросы ГХК до 1992 года. Несмотря на снижение интенсивности сбросов сначала в 1991–92 гг. после остановки двух прямоточных реакторов, затем в апреле 2010 г. по причине остановки последнего ядерного реактора по производству оружейного плутония, деятельность радиохимического завода и производство топлива для реакторов на быстрых нейтронах в настоящее время продолжает формировать радиоактивные сбросы в пойму р. Енисей. Ежегодно техногенные радионуклиды поступают из воды в донные отложения (ДО) и пойменные почвы р. Енисей, а также перераспределяются по течению на большие расстояния, в результате ежегодных весенне-летних паводков. В настоящее время в слоях ДО реки после сбросов ГХК зарегистрирован широкий перечень техногенных радионуклидов: радиоактивные изотопы европия, ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{90}Sr и трансурановые элементы (изотопы плутония, америция, нептуния и кюрия) [2, 4–6]. С момента начала работы ГХК на р. Енисей было три

крупных паводка: в 1966, 1988 и 2006 годах. Однако паводок 1966 года оказался самым экстремальным и сопровождался расходом воды до 18000 м^3/с [1] через плотину Красноярской ГЭС и привёл к затоплению многих прибрежных населённых пунктов [1]. Возросшая во время паводка скорость течения реки привела к переносу радиоактивных донных отложений и аллювиальных почв поймы реки из зоны вблизи ГХК на большие расстояния по течению реки – как минимум на 330 км (г. Енисейск) от ГХК. Вследствие этого образовались слои ДО и пойменных почв с аномальным содержанием ^{137}Cs по течению реки от ГХК [4]. В настоящее время в ДО р. Енисей накоплена значительная активность техногенных радионуклидов, которая может проявлять негативное влияние на окружающую среду и человека.

Целью работы является определение времени формирования слоёв аномального содержания ^{137}Cs в кернах ДО р. Енисей, отобранных на разном расстоянии по течению реки от сбросов ГХК.

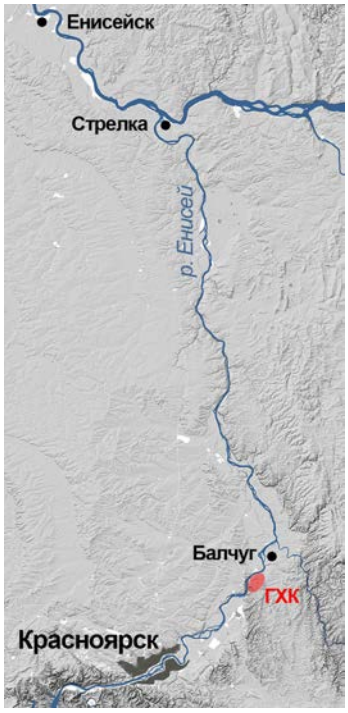


Рис. 1. Карта районов отбора проб

Материалы и методы

Для исследований использовали керны ДО, отобранных в пойме реки Енисей в период с 2009 по 2019 г по течению от г. Красноярска. Пробоотбор кернов ДО проводился в районах ежегодно-затапливаемых заводей берегового изгиба р. Енисей и островов в районе села Балчуг, расположенного в 30-км зоне влияния ГХК, так и на удалённых участках вблизи с. Стрелка (250 км от ГХК) (рис. 1). Для отбора использовали стальные пробоотборники – трубы разной длины с диаметром 11 см с лепестковым затвором.

На месте пробоотбора полученные керны ДО разрезали на слои по 3 см. В лаборатории слои кернов сушили при температуре 65 °С до постоянной массы, гомогенизировали и взвешивали. Удельную активность техногенных радионуклидов в пробах определяли γ-спектрометрическим методом на γ-спектрометре фирмы Canberra (США) со сверхчистым германиевым детектором с тонким бериллиевым окном, позволяющим регистрировать γ-кванты с энергией от 30 кэВ. Для определения скорости осадконакопления и датировки слоёв кернов после сбросов ГХК использовали отношение техногенных радионуклидов ^{137}Cs/^{60}Co, которое ранее показало хорошее совпадение результатов с расчётами по методу неравновесного ^{210}Pb [3].

Результаты и их обсуждение

По результатам γ-спектрометрического анализа кернов ДО были определены удельные активности техногенных радионуклидов ^{60}Co ($T_{1/2}$ = 5,27 г.), ^{137}Cs

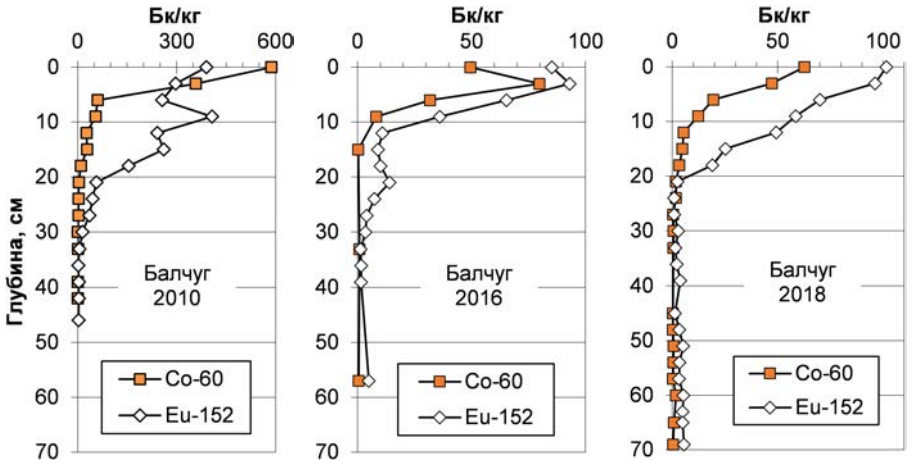


Рис. 2. Вертикальное распределение ^{60}Co и ^{152}Eu в кернах донных отложений р. Енисей, отобранных возле с. Балчуг в 2010, 2016 и 2018 гг.

($T_{1/2}$ = 30,2 лет), ^{152}Eu ($T_{1/2}$ = 13,5 лет), а также построены их вертикальные распределения. Характер распределения техногенных радионуклидов различается во времени и пространстве: максимумы ^{60}Co, ^{137}Cs и ^{152}Eu находятся как в верхних (до 5 см), так и в нижних слоях (до 65 см), также обнаружены керны с высоким аномальным содержанием ^{137}Cs.

Максимальное содержание ^{60}Co в кернах (рис. 2) локализовано на глубине 0–10 см, диапазон максимальных значений удельной активности изотопа составил 80–590 Бк/кг. В нижних слоях большинства исследованных кернов активность ^{60}Co приближается к пределу обнаружения (~ 1 Бк/кг), а глубже 40 см – достоверно не определялся. Наличие во всех кернах максимумов изотопа ^{60}Co в верхних слоях (0–10 см), а также его небольшой период полураспада, указывают на то, что до сих пор происходит свежее поступление ^{60}Co в ДО. Поступление ^{152}Eu в ДО аналогично поступлению ^{60}Co, и характеризуется максимумами ^{152}Eu в верхних слоях кернов (0–15 см). Диапазон максимальных значений удельной активности изотопа – 100–400 Бк/кг (рис. 2). Нахождение максимумов активности ^{60}Co и ^{152}Eu в верхних слоях кернов ДО, а также их относительно небольшие периоды полураспада указывает на одновременное новое поступление ^{60}Co и ^{152}Eu в ДО р. Енисей.

Высокое содержание ^{137}Cs с максимумами от 2200 Бк/кг до 26000 Бк/кг (табл. 1) присутствует как в верхних (до 20 см), так и нижних слоях кернов (до 65 см) в зависимости от участка отбора проб и гидрологического режима реки (рис. 3). Анализ распределения ^{137}Cs показал, что содержание ^{137}Cs в некоторых кернах характеризуется тем, что ниже максимума аномального содержания расположены слои с активностью на уровне менее 100 Бк/кг, опускающиеся до фонового уровня глобальных выпадений ^{137}Cs вследствие ядерных испытаний. Вертикальные распределения ^{137}Cs в таких кернах имеют по одному максимуму, и в области выше максимума удельная активность ^{137}Cs лежит в диапазоне от 200 до 1000 Бк/кг. Кроме этого наблюдаются обратные случаи распределения: выше максимума аномального содержания ^{137}Cs расположены слои с активностью менее 90 Бк/кг, а ниже максимума концентрация ^{137}Cs возрастает до 750 Бк/кг (рис. 3). Наличие всех наблюдаемых максимумов ^{137}Cs может быть обусловлено, как уровнем сбросов радиоизотопов ГХК в определённые периоды, так и гидрологическими условиями реки, в частности, крупными паводками.

Ранее Сухоруков с соавторами [4] отмечали, что в кернах аллювиальных почв береговой зоны г. Енисейска зарегистрировано аномальное содержание ^{137}Cs. При этом максимумы ^{137}Cs присутствовали как в глубоких слоях керна (90–105 см), так и в верхней части керна (0–15 см) (табл. 1, рис. 3). В отобранных нами в 2009–2019 годах кернах ДО и аллювиальных почв поймы реки Енисей вблизи сбросов ГХК (с. Балчуг) также были обнаружены слои аномального содержания ^{137}Cs в верхних и нижних слоях кернов (табл. 1, рис. 3). При этом максимальное содержание ^{137}Cs достигало 26000 Бк/кг для района вблизи п. Балчуг, что превосходило максимальные значения ^{137}Cs для района вблизи г. Енисейска (табл. 1).

Как следует из данных табл. 1, в некоторыхактивных по ^{137}Cs слоях кернов наблюдается отсутствие техногенного радионуклида ^{60}Co с малым периодом полураспада. Ранее авторы работы [4] датировали радиоактивную аномалию г. Енисейска 1966 годом (периодом экстремального паводка) и поэтому спустя 40–50 лет после паводка ^{60}Co регистрируется в пробах вблизи инструментального предела обнаружения. Радионуклиды ^{137}Csи ^{152}Eu имеют бóльшие периоды полураспада и за прошедший период их активности в измеренных пробах аномальных слоёв уменьшились не столь значительно.

Полученный нами диапазон отношений ^{137}Cs/^{152}Eu в пробах аномальных слоёв кернов вблизи сбросов ГХК варьирует от 150 до 2090, что пересекается с диапазоном отношения ^{137}Cs/^{152}Eu в пробах аномальных слоёв кернов г. Енисейска – 290–810 (табл. 1). Для кернов удалённых районов по течению реки от ГХК (Стрелка) отношение ^{137}Cs/^{152}Eu в пробах

Таблица 1. Удельная активность ^{137}Cs (Бк/кг) и отношение техногенных радионуклидов в аномальных слоях кернов донных отложений и пойменных почв р. Енисей

Район и год отбора	Глубина, см	^{137}Cs, Бк/кг	^{137}Cs/^{152}Eu*	^{137}Cs/^{60}Co*
Енисейск-1-1997 **	90–105	3500÷19900	290÷810	7000÷48000
Енисейск-2-1997 **	0–15	3500÷13100	600÷640	–***
Балчуг-2009	3–9 см	3200÷26000	260÷2090	16000
Балчуг-2010	27–33	2200÷2700	150÷200	5500
Балчуг-2012	18–24	2600÷8800	520÷800	–***
Балчуг-2016	9–15	3800÷17000	350÷460	3000
Балчуг-2018	57–63	1000÷3300	310÷610	2000÷4000
Стрелка-2012	42–48	1100÷3100	160÷240	1500÷2000

* – отношения радионуклидов приведены с пересчётом на 2018 год; ** – приведены данные работы Сухорукова с соавторами [4]; *** – в слоях отсутствует ^{60}Co в связи с многолетним радиоактивным распадом.

аномальных слоёв изменяется от 160 до 240 (табл. 1), что также соответствует отношению радионуклидов в аномальных слоях вблизи сбросов ГХК (Балчуг). Отношение радионуклидов $^{137}Cs/^{60}Co$ в пробах аномальных слоёв оказалось не столь информативным из-за более короткого периода полураспада ^{60}Co по сравнению с ^{137}Cs и ^{152}Eu. Как результат, рассчитанное на 2018 год отношение $^{137}Cs/^{60}Co$ в отдельных пробах аномальных слоёв г. Енисейска было в диапазоне 7000–48000, для проб аномальных слоёв вблизи ГХК – отношение $^{137}Cs/^{60}Co$ было в диапазоне от 2000 до 16000 или не определялось из-за отсутствия ^{60}Co (табл. 1). Следовательно, совпадающие отношения радионуклидов ($^{137}Cs/^{152}Eu$ и, при наличии, $^{137}Cs/^{60}Co$) в пробах аномальных слоёв по течению реки от ГХК с этими отношениями радионуклидов в аномальных слоях г. Енисейска свидетельствуют об одном и том же источнике происхождения – экстремальном паводке 1966 года на реке Енисей.

Для определения времени формирования слоёв аномального содержания ^{137}Cs в кернах ДО р. Енисей из района с. Балчуг, была проведена датировка кернов по рассчитанным скоростям седиментации по методу изотопных отношений $^{137}Cs/^{60}Co$. Так как данный метод предполагает равномерное поступление ^{137}Cs в ДО, то на основании этого была определена хронология его поступления в керны ДО. Верхний слой кернов соответствовал году пробоотбора. На рис. 4 представлена хронология поступления ^{137}Cs в ДО на примере кернов с двумя типами распределения ^{137}Cs, описанных выше. Активность ^{137}Cs датируется в этих кернах в период с 1962 до 2019 года. На рис. 4а наблюдается максимум 3300 Бк/кг активности ^{137}Cs в 1967 г. с учётом погрешности, происхождение которого объясняется экстремальным паводком на реке Енисей, происходившим в 1966 г., что совпадает с оценкой времени образования слоёв по значениям изотопных отношений $^{137}Cs/^{152}Eu$ и $^{137}Cs/^{60}Co$. Также в керне рис. 4а наблюдается область повышенной активности 570–860 Бк/кг, распределённая в более верхних слоях перед максимумом, что может быть объяснено паводком 1988 года.

На рис. 4б наблюдается максимум 2200 Бк/кг активности ^{137}Cs в 1990 г. с учётом погрешности, происхождение которого объясняется крупным паводком на реке Енисей, происходившим в 1988 г. Ниже максимума наблюдается подъём удельной активности с глубиной керна ДО. Такое увеличение активности ^{137}Cs до 750 Бк/кг в нижних слоях после максимума может объясняться экстремальным паводком, происходившим в 1966 году.

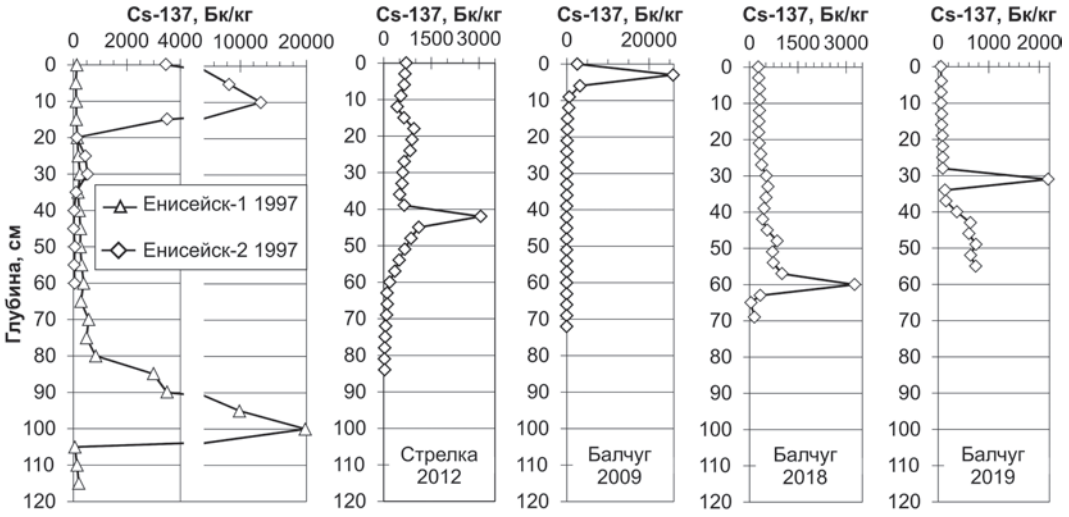


Рис. 3. Вертикальное распределение ^{137}Cs в кернах донных отложений р. Енисей

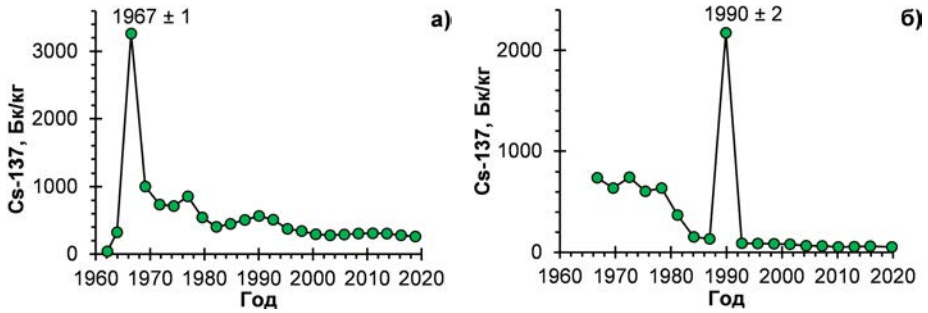


Рис. 4. Датировка слоёв кернов донных отложений, отобранных возле с. Балчуг, и определение в них времени происхождения аномального содержания ^{137}Cs

Заключение

В исследованных кернах ДО р. Енисей, отобранных на разном расстоянии по течению реки от сбросов ГХК, обнаружены слои аномального содержания ^{137}Cs (до 26000 Бк/кг), которые сопоставимы или превышают максимальные значения ^{137}Cs для радиоактивной аномалии береговой зоны г. Енисейска, и могут классифицироваться как очень низкоактивные радиоактивные отходы. Радиоактивная аномалия г. Енисейска возникла в результате переноса донных отложений из зоны ГХК во время экстремального паводка 1966 года. Керны, в которых слои обнаруженного максимального содержания ^{137}Cs локализованы выше слоёв фонового уровня ^{137}Cs, можно считать следствием паводка 1966 года. Об этом свидетельствует полученная нами датировка аномальных слоёв 1966 годом, а также совпадающие отношения радионуклидов (^{137}Cs/^{152}Eu и ^{137}Cs/^{60}Co) в пробах аномальных слоёв разных районов по течению реки от ГХК. Также обнаружены керны, для которых расчёт датировки показал влияние другого крупного паводка 1988 года.

При новых экстремальных паводках возможен перенос радиоактивных ДО и вынос их с глубины на поверхность. Поэтому выявление участков аномального радиоактивного загрязнения поймы реки Енисей позволит оценивать в будущем масштаб перераспределения радиоактивных ДО по течению реки.

Литература

1. Бабкин В. И. О регулировании речного стока в XXI веке. – Москва: Триумф, 2018. – 215 с.
2. Болсуновский А. Я. Новые данные по содержанию трансурановых элементов в донных отложениях реки Енисей / А. Я. Болсуновский, А. И. Ермаков, Б. Ф. Мясоедов и др. // Доклады Академии наук, 2002. – Т. 387. – № 2. – С. 233–236.
3. Болсуновский А. Я. Использование радиоизотопных методов датировки донных отложений реки Енисей / А. Я. Болсуновский, Д. В. Дементьев, С. В. Косиненко // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: материалы VI международной конференции. Казахстан. Семипалатинск, 2010. – В 2-х томах. – Т.1. – С. 114–118.
4. Сухоруков Ф. В. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей / Ф. В. Сухоруков, А. Г. Дегерменджи, В. М. Белолипецкий и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал «Гео», 2004. – 287 с.
5. Bolsunovsky A. and Bondareva L. Actinides and other radionuclides in sediments and submerged plants of the Yenisei River // J. Alloy. Compd., 2007. 444–445. – P. 495–499.
6. Bolsunovsky A. New data on transuranium elements in the ecosystem of the Yenisei river floodplain / A. Bolsunovsky, A. Ermakov, A. Sobolev // Radiochim. Acta, 2007. – 95 (9). – P. 547–552.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫЯВЛЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА В ОБРАМЛЕНИИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ

А. П. Долгушин

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья»
АО «СНИИГГиМС»
Новосибирск, Россия, dolgushin1960@mail.ru

PROSPECTS FOR IDENTIFYING URANIUM DEPOSITS FRAMED BY THE WEST SIBERIAN PLATE

A. P. Dolgushin

JSC "Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources "JSC "SNIIGGiMS"
Novosibirsk, Russia, dolgushin1960@mail.ru

The Central Siberian region has significant uranium ore potential, including the world's most sought-after "dissent" and sandstone ores. • 12 potential uranium ore areas have been identified in the Central Siberian region, most of which are currently poorly studied and within which new, including large, uranium deposits can be identified. • The most promising are-as for the identification of new deposits in the Central Siberian region are: Severo-Yeniseysky (deposits of the "dissonance" type); Minusinsky and Tuva (stratiform deposits); Mariinsky, Rubtsovsky and Taseyevsky (sandstone type suitable for PV).

Введение

Все выявленные урановые объекты территории Центральной Сибири можно сгруппировать в 4 основные группы:

- типа «несогласия» в докембрийских породах;
- песчаникового типа в проницаемых отложениях мезозойско-кайнозойского воз-раста (пригодные для ПВ);
- осадочно-диагенетические (стратиформные) в отложениях палеозойских впадин;
- гидротермальные.

Материалы и методы

Месторождения типа «несогласий» приурочены к крупным архейско-раннепротерозойским тектоно-выступам фундамента Сибирской платформы и группи-руются в 4 урановорудных района: Северо-Енисейский, Приенисейский, Южно-Енисейский и Бирюсинский [3, 4]. Рудные объекты типа «несогласий» выявлены в се-верной части Енисейского Кряжа в полосе налегания рифейского чехла на архейско-раннепротерозойские поднятия с гранитогнейсовыми куполами и горизонтами углеро-дистых сланцев. Урановое оруденение выявлено [1, 3] как в породах фундамента (место-рождения Осиновское, рудопроявления Кутукасское, Ясное, Ногатинское, Вексельное), так и в рифейских терригенно-вулканогенных породах, залегающих выше зоны несогласия (месторождения Оленье, Кедровое, рудопроявления Тейское, Медвежье, Дубовое). Руды настуран-коффинитовые часто содержат золото. Содержание урана от 0,03–0,1 % до 17 %. Наиболее крупное по запасам Оленье месторождение вмещает 13000 т урана по ка-тегории C_2.

Урановое оруденение в мезозойско-кайнозойских сероцветных терригенных отложениях выявлено в краевой части Западно-Сибирской плиты и связано с зонами пластовогрунтового окисления. Урановорудные объекты с гидрогенным урановым оруденением в рыхлых отложениях Западно-Сибирской плиты расположены в полосе шириной 50–70 км, которая протягивается более чем на 1000 км вдоль всего северного склона Алтае-Саянской горно-складчатой области [2]. Здесь выявлено 4 урановорудных района с гидрогенным оруденением – Мариинский, Приобский, Рубцовский и Михайловский, которые приурочены к участкам погружения под платформенный чехол ураноносных пород фундамента. Урановое гидрогенное оруденение приурочено как границе выклинивания региональной зоны пластового окисления, так и локализуется в палеорусловых структурах. Протяженность палеодолин составляет 5–45 км. Содержание урана от тысячных долей процента до 0,068 %, при среднем – 0,012 %. Наиболее крупное Малиновское место-рождение, вмещает запасы урана по категории C_{1+2} 1606 т при среднем содержании 0,059 %, и прогнозные ресурсы категории P_1 – 5928 т, при среднем содержании урана 0,043 %.

Стратиформые месторождения урана в верхнепалеозойских вулканогенно-осадочных впадинах выявлены в Минусинском и Тувинском прогибах, где многочисленные мелкие месторождения и рудопроявлениями объединяются в крупные ураноносные зоны, которые протягиваются на десятки километров. Основными типами уранового оруденения в

этих впадинах являются: стратиформное уран-сульфидное в пестроцветных молассоидных отложениях впадин (месторождения Приморское, Тигир-Тайшенское, Оглахтинское, Чалгызхырское, Бол. Сибигур); фосфор-урановое в прибрежно-морских, лагунных отложениях (месторождения Монастыревское, Кызынджульское, Тумнинское, Юрган); настуран-коффинитовое с полиметаллами, золотом и серебром в углефициро-ванных песчаниках, алевролитах, туфах карбона и девона (Онкажинское, Восточно-Онкажинское, Усть-Уюкское месторождения). Ураноносные зоны прослежены на 1200–3300 м при ширине 100–200 м и вмещают линзопластообразные рудные залежи с содержанием урана в от 0,01 % до 11 %. На наиболее крупном месторождении Усть-Уюкском запасы урана по категориям C_{1+2} составляют 13200 т, при содержании урана 0,09 %, а про-гнозные ресурсы категорий P_{1+2} оцениваются в 13400 т. На Онкажинском и Восточно-Онкажинском месторождениях запасы урана составляют – 5000 т, при среднем содержа-нии урана 0,33 %, а ресурсы категории P_1 оцениваются в 21000 т.

К гидротермальным объектам можно отнести комплексные руды Карасугского месторождения в Тувинском прогибе, локализованные в крутопадающих брекчиях эруптивного типа (карбонатиты). Рудные тела урановых, железных, редкоземельных (цериевая группа), баритовых, флюоритовых руд с полиметаллами, золотом и серебром имеют размеры от 170 × 30 м до 1550 × 165 м со средним содержанием урана 0,019 % (0,005–2,34 %); железа – 28,1 %; флюорита – 9,6 %; барита – 16,7 %; суммы оксидов редких земель – 1,07 %. Запасы урана в комплексных рудах наиболее крупного Карасугского месторождения по категории C_{1+2} составляют 50800 т, ресурсы категории P_1 оцениваются в 87400 т.

Многочисленные более мелкие гидротермальные месторождения урана выявлены в палеозойских эффузивах и вмещающих их сланцах, характеризуются крутым залеганием и небольшим размером рудных тел с настуран-коффинитовым жильно-гнездово-вкрапленным оруденением и содержаниями урана от 0,07 % до 1–7 % (при среднем содер-жании 0,1 %). Месторождения приурочены, как правило, к зонам крупных разломов и выявлены в двух рудных районах: Кузнецко-Алатаусском (месторождения Шерегешевское, Базасское, Лабышское, Каракольское, Скалистое, Светлое) и Агульском (месторождения Рябиновое, Магнитное, Чагинское).

Заключение

- Центрально-Сибирский регион имеет значительный урановорудный потенциал, включая наиболее востребованные в мире руды типа «несогласия» и песчаникового типа.
- На территории Центрально-Сибирского региона выявлено 12 потенциальных урановорудных районов, большая часть из которых в настоящее время слабо изучена и в пределах которых могут быть выявлены новые, в том числе, крупные месторождения урана.
- Наиболее перспективными районами для выявления новых месторождений на территории Центрально-Сибирского региона являются: Северо-Енисейский (месторождения типа «несогласий»); Минусинский и Тувинский (стратиформные месторождения); Мариинский, Рубцовский и Тасеевский (песчаниковый тип, пригодный для ПВ).
- Большая часть мелких месторождений урана стратиформного и песчаникового типа расположены в легко доступной местности, сближены между собой и уже сейчас могут рассматриваться в качестве объектов добычи открытым способом или с применением ПВ малыми предприятиями.

Литература

1. Долгушин А. П., Кочкин Г. Б., Румянцев Н. Н. Месторождения «типа несогласий» на Енисейском кряже / Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкозе-мельных металлов. – М., 2001. – Вып. 143. – С. 52–61.
2. Долгушин А. П., Рубинов И. М., Макарова Т. А., Арзамасова Г. М. Некоторые особенно-сти размещения гидрогенного уранового оруденения в юго-восточной части Западно-Сибирской плиты / Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России. Томск, 2000. – С. 98–100.
3. Долгушин А. П., Румянцев Н. Н. Золото-урановое оруденение «типа несогласий» на западе Сибирской платформы (Енисейский кряж и Восточный Саян) / Труды Международ-ного симпозиума по геологии урана «Уран на рубеже веков: природные ресурсы, производство, потребление». – М., 2002. – С. 197–205.
4. Долгушин А. П., Черкасов Г. Н. Перспективы выявления богатого уранового и золото-уранового оруденения в Северо-Енисейском и Восточно-Саянском рагионах // Материалы научно-практической конференции: Геология и минерально-сырьевые ресурсы Центральной Сибири и прилегающих территорий. – Красноярск: ОАО Красноярскгеолсъемка, 2007. – С. 239–245.

О НОВОЙ КОНЦЕПЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗМЕЩЕНИЯ УРАНОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ ВОСТОЧНОЙ ОКРАИНЫ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ

В. А. Домаренко[1], Ю. Б. Миронов[2], Е. А. Воробьев[3]

[1]МПРиООС РФ
Томск, Россия, viktor_domarenko@mail.ru
[2]ФГУП ВСЕГЕИ
Россия, mironov-yb@mail.ru
[3]МПРиООС РФ
Россия, turga@mail.ru

ON A NEW CONCEPT OF THE FORMATION AND PLACEMENT OF URANIUM MINERALIZATION IN THE EASTERN MARGIN OF THE WEST SIBERIAN PLATE

V. A. Domarenko[1], Yu. B. Mironov[2], E. A. Vorobyov[3]

[1]FGAOU VO NI TPU
Tomsk, Russia, viktor_domarenko@mail.ru
[2]FGUP VSEGEI
Russia, mironov-yb@mail.ru
[3]MPRiOOS of the Russian Federation
Russia, turga@mail.ru

On the territory of the West Siberian Plate, at the late stages of regional uplifts, with the wide development of deep-penetrating disjunctive structures, which are located mainly in the marginal parts of the NGB, hydrodynamically closed systems open up and huge masses of stratified mineralized water are involved in migration. They are moving both due to the compression mechanism (similar to hydrocarbon fluids) and due to exfiltration. Areas of discharge of underground aggressive waters can be open horizons of the well-known West Siberian iron ore field, horizons enriched with organic matter, etc. sorbents.

Введение

В последние годы по производству и потреблению урана Россия занимает третье-четвертое место в мире. Потребление урана в мировой энергетике превышает его первичное производство почти вдвое. Дефицит покрывается экспортом урана в западные страны из стран СНГ. Атомные электростанции России вместе с атомными электростанциями Восточной Европы, построенными по советским технологиям, потребляют около 6 тыс. т урана в год. Дефицит производства, как в России, так и в мире в целом имеет тенденцию к росту. Поэтому, в ближайшие 10–15 лет, даже при использовании оружейного урана, Россия может оказаться не обеспеченной собственными ресурсами урана. Использование плутония в качестве ядерного топлива, видимо, увеличит этот срок еще лет на 10.

Возможности роста мощностей уранодобывающей промышленности в перспективе до 2015–2020 гг. и далее остаются крайне ограниченными. АООТ «ППГХО» работает на пределе своих возможностей и на неуклонно ухудшающейся минерально-сырьевой базе. Промышленность может задействовать в указанный период не более двух новых добывающих предприятий на основе технологии СПВ (скважинного подземного выщелачивания) с общей годовой производительностью не выше 1000–1500 т урана на базе ранее открытых некрупных месторождений, т. н. «палеодолинного типа» в Курганской области и Республике Бурятии [11].

Этот прирост добычи урана не может изменить общую крайне негативную многолетнюю тенденцию с обеспеченностью сырьём отечественных АЭС, не говоря уже об экспортных возможностях страны. В связи с этим возникает необходимость в увеличении потенциала минерально-сырьевой базы урана.

Изменить ситуацию возможно двумя путями:

1) Начать отработку богатых, упорных и дорогих руд Алдана, что вряд ли будет выгодно в силу достаточно сложных горно-геологических и географо-экономических условий.

2) Найти крупный объект в пределах восточной окраины Западно-Сибирской плиты.

По укоренившимся представлениям в пределах Западной Сибири в силу особенностей истории её геологического развития не может быть крупных месторождений урана пластового «песчаникового» типа. Мелкие же и средние месторождения палеодолинного типа юрского (?) возраста, расположенные на южной, юго-западной и юго-восточной окраинах плиты (Далматовское, Хохловское, Семизбай, Пригородное, Михайловское, Смоленское, Малиновское, Новое, Ледяшевское, Костылёвское, Быстрое и др.) [3, 11, 12, 19], погоды не делают.

Материалы и методы

Анализ материалов предшественников и полученные нами в ходе выполнения Федеральной программы «Оценка ресурсного потенциала южной окраины Западно – Сибирской плиты с выделением перспективных площадей для прогнозно-поисковых работ масштаба 1 : 200 000 данные (работы проводились совместно с ВИМС, ВСЕГЕИ, под эгидой ФГУГП «Урангео») выявили некоторые новые факторы, позволяющие надеяться на выявление крупных урановорудных объектов на востоке и северо-востоке Западно-Сибирской плиты, возможно, нового нетрадиционного типа.

Результаты и обсуждение

За аксиому нами приняты два постулата:

1) Все крупные урановорудные провинции гидрогенного генезиса располагаются по периферии нефтегазоносных бассейнов;

2) Наиболее продуктивная эпоха для руд данного генезиса по аналогии с Шу-Сарысуйской урановорудной провинцией – мел – палеоген – неогеновая [2, 3, 12, 18].

Для возникновения урановых руд в процессе эпигенеза необходимо совпадение в одном и том же месте следующих главных критериев: 1) наличие благоприятных литолого-фациальных условий; 2) благоприятная радиогеохимическая обстановка (наличие аномалий и проявлений урана, зон перераспределения радиоэлементов); 3) гидрогеохимическая зональность и повышенные концентрации урана в подземных водах; 4) благоприятная гидродинамическая и геотектоническая обстановка; 5) наличия восстановительного барьера.

С точки зрения классической теории эпигенетического уранового рудообразования эти критерии разработаны на примере Северо-Тяньшанской мегапровинции.

Как известно, в отношении источника урана в настоящее время существует три основные гипотезы: 1) уран поступает из разрушающихся пород домезозойского обрамления впадин (хр. Каратау), 2) извлекается из пород самих продуктивных горизонтов и 3) привносится растворами глубинного происхождения.

Имеется предположение генетической связи этих месторождений с глубинными процессами и связанной с ними магматической деятельностью, сопровождавшей развитие урановорудного процесса (Канжуганский урановорудный район). Эта точка зрения существенно отличается от общепринятых представлений об их экзогенном генезисе в процессе формирования зон пластового окисления. Основы теории формирования урановых месторождений в водопроницаемых горизонтах рыхлого платформенного чехла были разработаны по данным, полученным главным образом при изучении месторождения Учкудук. Это месторождение, выявленное в 1953 г. при наземной оценке аэрорадиометрической аномалии, явилось родоначальником нового генетического типа, названного «учкудукским» [2, 12, 19].

Пластово-инфильтрационная концепция рудообразования основывается на закономерной приуроченности оруденения к границе перехода желтых (лимонитизированных) песков в сероцветные (пиритизированные). Таким образом, у геологов появился поисковый признак, получивший название «граница зоны пластового окисления» (ЗПО). Практическое применение этого удобного в работе признака привело к открытию ряда месторождений расположенных в песчаных, горизонтах мела вблизи выступов палеозойского фундамента. Это послужило основанием для возведения признака в ранг «сквозного» критерия, который стал стержнем экзогенной теории.

Теория стала давать серьезные сбои при проведении прогнозно-поисковых работ в Шу-Сарысуйской и Сырдарьинской депрессиях. Предполагалось, что областями сноса рудного вещества служат Шуйское поднятие и хр. Каратау, и перспективными признавались прилегающие площади. Однако целенаправленные поиски бурением, проведенные в 1961–1968 гг. к открытиям месторождений не привели. Более того, по результатам проведенных работ Шу-Сарысуйская депрессия была признана бесперспективной.

Последующие, поисково-разведочные работы и накопленные данные обнаружили ряд фактов, не находящих объяснения с позиций экзогенного генезиса руд и прямо или косвенно указывающих на глубинное происхождение ураноносных растворов.

1. Практически все урановые месторождения Шу-Сарысуйской и Сырдарьинской провинции прослеживаются на десятки и сотни километров либо в широтном, либо в меридиональном направлении. Причем меридиональные рудоносные полосы как, в палеогеновых, так и в меловых горизонтах переходят из одной рудной провинции в другую; горный хр. Каратау, разделяющий эти провинции, как бы пересекает единые рудоносные зоны. Ни границами литолого-фациальных обстановок, ни границами региональных ЗПО этот факт не объясняется, так как они должны в целом повторять весьма прихотливые формы границ разных по фильтрационным свойствам фациальных зон.

2. О рудоконтроле вертикальными структурами свидетельствуют и следующие факты: часто наблюдаемый афациальный (секущий) характер рудных тел по отношению к простиранию и падению рудовмещающих пород; наличие рудных узлов с многоярусным оруденением (расслоенных «столбов»), где «раздувы» рудных тел по мощности (до десятков метров), как правило, сопровождаются расширением залежи по латерали (до 1 км и более); приуроченность оруденения в рудных «столбах» к разным стратиграфическим горизонтам с различными литолого-

фациальными и фильтрационными особенностями вмещающих отложений; наличие контролируемых блоковыми разломами изолированных рудных залежей среди окисленных и сероцветных пород с вертикальным ореолом радиоактивных аномалий (до 100м), проникающих в перекрывающие глины.

3. В рудной зоне наблюдаются характерные для гидротермальных месторождений карбонатизация, каолинизация, гематитизация, пиритизация, мусковитизация (слюдизация) и другие изменения, наложенные на продуктивные пески и имеющие локальный характер (выклинивающиеся вверх прожилки кальцита, кварца, гематита, пирита и др.). При этом интенсивность наложенных изменений закономерно возрастает вниз по разрезу, что придает нижележащим глинисто-алевролитовым прослоям пестроцветный облик. К низу увеличивается также роль отдельных эпигенетических минералов (карбонатов, каолинита, слюд и т. д.).

4. В рудных песках с явными следами тектонической активизации (брекчированием) встречаются ураганно-высокие содержания урана (до 23 %), молибдена, цинка, свинца (до 1%), мышьяка (до 0,3 %), германия (более 0,1 %), аномальные концентрации меди, кобальта, никеля, фосфора, марганца, ванадия и других элементов; сопутствующими являются селен, рений, скандий, редкие земли, иттрий. Многие из названных элементов в экзогенных условиях миграционной способностью не обладают.

5. На рудных полях отмечается нарушение природной гидрохимической зональности, связанное с внедрением глубинных хлоридных вод в верхние горизонты с карбонатными и сульфатными вод.

Главным рудоконтролирующим фактором являются активизированные разломные зоны ортогональной системы, вдоль которых в рыхлых отложениях чехла под воздействием восстановительных газов формируется устойчивый геохимический барьер. Эти же каналы служат проводниками для рудообразующих гидротермальных растворов. Данная генетическая модель формирования урановых руд применима для месторождений Сырдарьинской урановорудной провинции (месторождения Канжуган, Мойынкум).

Похожую теорию рудообразования предлагает Г. В. Комарова [7, 9] для месторождений, образованных восходящими жильными водами:

В последние годы становится все больше сторонников концепции значительного участия в формировании УРМ в чехле платформ ювенильных вод и вод глубокой циркуляции. Наиболее представительным месторождением этого типа является УРМ Гамр (Стражский блок), где урановое оруденение в прибрежно¬морских отложениях грабенообразных прогибов связано с зонами пластового окисления и наложенными гидротермальными процессами. (*Не исключено, по мнению Е. М. Шмариовича, участие высокотермальных вод глубокой циркуляции в формировании ряда УРМ (Амброзия-Лейк и др.)* [7].

Таким образом, экзогенно-инфильтрационная гипотеза (теория), как нам представляется не является бесспорной

Однако, исходя из общетеоретических соображений для рудообразования необходимо наличие 4 главных компонентов:

1. Источник рудного вещества.
2. Отделение рудного вещества от источника.
3. Перенос рудного вещества транспортирующими агентами.
4. Отложение рудного вещества в благоприятных обстановках.

Рассмотрим, как работают эти критерии в пределах Западно-Сибирской плиты.

1. Источник рудного вещества

Потенциальный ураноносный Бакчар-Колпашевский пояс (в том числе его фрагмент в пределах листов О–44,45, Томская область) расположен на восточной окраине Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Нефтематеринские породы района представлены отложениями баженовской свиты.

Баженовская свита по многим параметрам является уникальным геологическим образованием в глобальном масштабе. Нигде на континентальной части земного шара не известно осадочной толщи столь обширной по площади (порядка 1 млн. кв. км), устойчивой по мощности (в среднем 30 м), богатой органическим веществом и резко повышенным содержанием урана, никеля, кадмия, кобальта, молибдена, мышьяка, ванадия, меди, бария, бора, галлия и других элементов…» Среднее содержание урана в баженовитах по разным источникам различное, но всегда высокое. По Нестерову И. И. – $34 \cdot 10^{-4}$ % [13], по Плуману И. И. – от $23 \cdot 10^{-4}$ % до $70 \cdot 10^{-4}$ % [14]. Если в основе оценки рассматривать указанные площадь распространения баженовской свиты (1 млн. кв. км), среднюю мощность (30 м), среднее содержание урана в отложениях (35 г/т) и объемную массу вмещающих пород (2,0 т/м^3), то геохимический ресурс урана баженовской свиты составит порядка 2 млрд. тонн. Эти результаты и рассматриваются в качестве обоснования возможного источника урана для дальнейших построений модели формирования урановорудных объектов.

2. Отделение рудного вещества от источника

Теоретические основы механизма эпигенетического и, в какой-то мере, эксфильтрационного рудообразования заложены в работах Лебедева Б. А. и др. [10], Комарова Г. В. [11], Адамса [20] и других исследователей.

В частности, Б. А. Лебедев теоретически обосновал химизм процесса взаимодействия углеводородов и породы, принципиальная формула которого выглядит следующим образом:

$2[SiO_4]_4 + CH_4 \rightarrow 2SiO_4 + 2H_2O + CO_2$, т. е. – при взаимодействии углеводородов с алюмосиликатной породой образуется некоторое количество кремнекислоты, воды и углекислоты. Последние, как известно, являются достаточно агрессивной средой и при благоприятных условиях могут выщелачивать и переносить металлы в виде карбонатных ионов уранила по классической формуле массопереноса:

$$UO_{22+} + 2CO_2 + 2H_2O \leftrightarrow UO_2(CO_3)_2^{2-} + 4H^+.$$

Следует учитывать, что уран может переноситься и органическими кислотами, которых достаточно в нефтяных водах и с которыми он образует подвижные в условиях восстановительной среды урановоорганические соединения типа $U(C_5H_5)_4$.

3. Перенос рудного вещества транспортирующими агентами

Формирование в осадочных бассейнах как залежей нефти и газа, так и стратиформных залежей эпигенетических руд генетически взаимосвязано, поскольку оба процесса обусловлены наложенным эпигенезом. С этих позиций механизмы нефтегазонакопления и рудообразования весьма схожи: двигающийся по эффективному пустотному пространству агрессивный флюид взаимодействует с вмещающими породами, производя их боковые изменения с перераспределением вещества, после чего эффективный коллектор, в том числе новообразованный, заполняется полезными компонентами (углеводородами в нефтегазоносных бассейнах, рудными минералами в рудоносных бассейнах или в рудоносных частях нефтегазоносных бассейнов).

Важное различие этих процессов состоит в характере движущегося флюида: металлоносного водного раствора в рудогенезе и углеводородного (безводного) флюида в нафтогенезе. Преобладание того или другого типа мигрирующих флюидов причинно связано со стадией развития бассейна и с интенсивностью тектонических движений.

На ранних этапах преимущественного прогибания осадочного бассейна движение вод крайне медленное и обусловлено их постепенным отжатием при уплотнении пород. Именно на этих этапах широко проявляется миграция углеводородных смесей, в основном обусловленная компрессионной энергией растворенного газа (определяющей в том числе возникновение аномально высоких пластовых давлений). Это приводит к формированию промышленных залежей нефти и газа в крупных антиклинальных структурах.

На поздних этапах региональных воздыманий при широком развитии дизъюнктивных нарушений происходит раскрытие гидродинамически замкнутых систем, в миграцию вовлекаются колоссальные массы пластовых соленых вод, двигающихся как за счет компрессионного механизма (как и в случае углеводородных флюидов), так и за счет эксфильтрационного механизма. В итоге нефтегазонакопление и эпигенетическое рудообразование разделены как во времени жизни осадочного бассейна, так и в пространстве. Формирование эпигенетических руд происходит преимущественно в воздымающихся раскрытых частях осадочных бассейнов, а формирование залежей нефти и газа в наиболее гидродинамически изолированных частях бассейнов, надежно экранированных региональными покрышками.

Увеличение интенсивности тектонических подвижек приходится для Западно-Сибирского бассейна на поздне-мел-палеогеновое время, после формирования основных залежей железных руд или близко одновременно с ними. Это приводило к частичному раскрыванию системы и элизионному перетоку растворов из областей высоких давлений в области низких, т. е. к поверхности.

4. Отложение рудного вещества в благоприятных обстановках

Областями разгрузки рудоносных растворов могут являться железоносные горизонты, горизонты, обогащённые органикой и др.

Железо колпашевского, нарымского и бакчарского горизонтов могло служить физико-химическим барьером для рудоносных растворов как эксфильтрационных, двигающихся со значительных глубин, так и инфильтрационных движущихся с юго-востока, со стороны Алтае-Саяна и с востока - со стороны Енисейского кряжа. Косвенным свидетельством тому являются аномалии по гамма-каротажу в некоторых скважинах, пересекающих железоносные отложения.

Таким образом, анализ материалов предшественников и наши наблюдения позволили выявить градиентную зону, шириной до 100 км и протяжённостью до 500 км в пределах Томской области (Бакчар-Колпашевская зона), а в целом до 6000 км вдоль восточной окраины Западно-Сибирской плиты. В пределах этой зоны могут быть обнаружены гидрогенные месторождения урана относящиеся к так называемому «песчаниковому» типу, которые сегодня обеспечивают почти 60 % общей мировой добычи урана. Месторождения этого промтипа отрабатываются самым высокоэффективным и экологически предпочтительным способом – скважинным подземным выщелачиванием.

Здесь из месторождений «песчаникового типа», предполагается выявление урановых месторождений образующихся в раскрытых частях нефтегазоносного бассейна (НГБ). К этому типу относятся родоначальник «песчаникового типа» – урановые

месторождения платоКолорадо в США, локализующиеся в позднеюрских песчаниках, осваиваемые уже больше полувека.

По данным гидрогеохимического районирования в пределах Обь – Енисейского междуречья [3, 4, 12, 14] отчётливо выделяются три гидрогеохимические зоны по всему разрезу осадочного чехла:

• западная зона, развитая на левобережье р. Оби, с водами существенно хлоридного состава;

• восточная – развитая в основном на правобережье р. Оби простирающаяся вплоть до р. Енисей, с водами существенно гидрокарбонатного состава;

• зона смешанных вод на уровне меловых отложений.

В первом приближении зона смешанных вод совпадает со сменой литофаций от субконтинентальных через прибрежно-морские к абиссальным и распространения железоносных отложений известного уникального по масштабам Западно-Сибирского железорудного бассейна.

Последнее обстоятельство является важным критерием подтверждения того, что эта зона является областью катагенной разгрузки пластовых вод НГБ, локализующих крупные железорудные скопления.

Формирование месторождений оолитовых руд железа Западно-Сибирского бассейна восходящей катагенной разгрузкой подземных вод НГБ естественный результат эволюции осадочных бассейнов, как и месторождений углеводородов, с которыми рудные залежи связаны парагенетически [4, 5, 6, 15, 16]

Вмещающими толщами являются катагенетически преобразуемые глинистые слои на глубинах 2–4 км, в том числе глины баженовского горизонта, обогащенные ураном.

Объемы новообразованных катагенных вод могут значительно превышать имеющиеся поровые объемы водоотводящих проницаемых толщ, что приводит к созданию эксфильтрационных геогидродинамических систем, энергетически существенно более мощных, чем элизионные, определяемые простым гравитационным отжатием поровых вод [2].

Длительность существования катагенных геогидродинамических систем измеряется десятками миллионов лет. Однако процесс их разгрузки носит в основном характер импульсных прорывов, при возрастании теплового потока, возобновлениях тектонической активности и прогибания он может многократно возобновляться [2, 6], в определённых геолого-геоморфологических условиях имеет режим постепенного высачивания (палеоберега морей, речные палеодельты и русла).

Подземные воды НГБ металлоносны; важные факторы концентрирования ими металлов – термальность (до 100 °С), благоприятные особенности состава (наличие растворенного органического вещества, хлоридов, углекислоты), развитие на путях фильтрации взаимодействий раствор-порода.

Совокупность этих обстоятельств объясняет неизбежность формирования на пути миграции и в зонах открытой катагенной разгрузки подземных вод НГБ рудных и возможно нерудных накоплений на различных барьерах (восстановительно-окислительном, кислотно-щелочном, сорбционном, термальном и т. д.) в соответствии с геохимической спецификой элементов и соединений. Положение барьеров в плане как правило могут значительно (от сотен метров до десятков километров) расходится.

Формирование оолитовых железных руд Западно-Сибирского поясавыполнялось региональным потоком восходящих вод. Последний, развиваясь по латерали из центра бассейна, дренировался зонами дизъюнктивных дислокаций, вскрывавшимися во времена тектонической активизации (смена трансгрессий и регрессий) вдоль окраины континента, где и отлагались руды на восстановительно-окислительном барьере. При этом геологическая позиция главных рудоносных площадей – Бакчарской и Колпашевской – определяется не только такой приуроченностью, но и расположением над крупным конседиментационным Парабель-Майзасским поднятием, что рассматривается в качестве типовой ситуации для формирования зон катагенной разгрузки хлоридных минерализованных подземных вод НГБ [6]. Кроме сказанного, эти зоны могут также являться областями разгрузки инфильтрационных гидрокарбонатных, пресных, кислородсодержащих вод, развивающихся от предгорных областей питания окраины бассейна, образуя зону смешанных вод, указанную выше.

Перенос и аккумуляции урана катагенными растворами предполагается не только возможностью извлечения его из глин баженовской свиты, но и подтверждается выявленными в железных рудах локальными проявлениями урана.

Помимо этого, в пределах переходной зоны с запада на восток, по данным наземных геохимических маршрутов, резко снижается значение общей радиоактивности, содержаний урана (по радию), наблюдается интенсивное перераспределение тория и дифференциация торий\уранового отношения. Дифференцируются и аномалии ТЛД (термо-люминисцентный детектор).

При ревизии и переопробовании керна и шлама многочисленных нефтепоисковых скважин в Западном Казахстане были выявлены содержания свинца, цинка, марганца, молибдена, кадмия и др. металлов, в десятки – сотни раз превышающие кларковые. В связи с этим было предложено рассматривать нефтегазоносные бассейны как потенциально рудные [7].

Масштабы массопереноса и рудонакопления в зонах катагенной разгрузки Западно-Сибирского бассейна можно оценить по соотношению содержания железа в глеевых рудоформирующих водах – первые

десятки грамм на кубометр и массы отложенного ими в рудах металла – сотни млрд. т. Это позволяет прогнозировать очень крупные масштабы переноса урана (сотни тысяч тонн), других элементов и аккумуляции их на барьерах в соответствии с геохимической специализацией.

Заключение

На территории Западно-Сибирской плиты на поздних этапах региональных воздыманий при широком развитии глубокопроникающих дизъюнктивных структур, которые располагаются преимущественно в краевых частях НГБ, происходит раскрытие гидродинамически замкнутых систем и в миграцию вовлекаются огромные массы пластовых минерализованных вод, двигающихся как за счёт компрессионного механизма (аналогично углеводородным флюидам), так и за счёт эксфильтрации [1, 6]. Увеличение интенсивности тектонических подвижек приходится для Западно-Сибирского бассейна на верхне-мел-палеогеновое время, что в свою очередь способствовало частичному раскрыванию системы и элизионному перетоку растворов из областей высокого давления в область низких. Областями разгрузки подземных агрессивных вод могут являться открытые горизонты известного Западно-Сибирского железорудного поляса, горизонты, обогащенные органикой и др. сорбенты.

Железоносные отложения колпашевского, бакчарского и нарымского горизонтов могли служить физико-химическим барьером для рудоносных растворов как эксфильтрационных, двигающихся со значительных глубин, так и инфильтрационных, движущихся с юго-востока со стороны Алтае-Саяна и с востока – со стороны Енисейского кряжа.

Публикация осуществлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований 19-45-700001\19.

Литература

1. Бурштар М. С., Назаров Д. А. Методика построения региональных схематических карт палеогидродинамической обстановки // Советская геология, 1970. – № 9. – С. 195.
2. Гидрогенные месторождения урана. Основы теории образования // Под ред. А. И. Перельмана. – М.: Атомиздат, 1980. – 270 с.
3. Домаренко В. А., Воробьев Е. А., и др. Основные результаты и перспективы развития геолого-разведочных работ на радиоактивное сырье в центрально-Сибирском регионе // Известия ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – Т. 314. – № 1. – С. 92–96.
4. Ермашёва Н. А. Геохимия подземных вод зоны активного водообмена Томской области в связи с решением вопросов водоснабжения и охраны // Автореферат диссертации канд. геол.-мин. наук. – Томск, 1998. – 44 с.
5. Западная Сибирь // Геология и полезные ископаемые России. В шести томах. Т.2./ Гл. ред. В. П. Орлов. Ред. 2-го тома: А. Э. Конторович, В. С. Сурков. – СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. – 477с.
6. Карцев А. А., Павлов Д. И. Зоны катагенной разгрузки подземных вод нефтегазоносных бассейнов и осадочный рудогенез // Геология рудных месторождений, 1995. – Т. 37. – № 2. – С. 122–131.
7. Кисляков Я. М., Щеточкин В. Н. Гидрогенное рудообразование. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. – 608 с.
8. А. Э. Конторович, Ю. Н. Занин., В. Н. Меленевский, А. Г. Замирайлова, А. Н. Фомин, Д. Ю. Давыдов Твердые битумы баженовской свиты Западно-Сибирскойплиты и главные особенности их геохимии // Геохимия, 1999. – № 8. – С. 888–896. Поступила 05.11.2014 г.
9. Крупномасштабное прогнозирование и составление прогнозных на уран карт. Ленинград // Методические рекомендации 1983.
10. Лебедев Б. А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. – Недра, Ленингр. отд-ние, 1991. – 238 с.
11. Машковцев Г. А., Мигута А. К., Щёточкин В. Н. Современные научные основы прогнозирования урановых месторождений // Второй международный симпозиум. Уран: ресурсы и производство. Москва, 26–28 ноября 2008 г. Сборник трудов. – М.: ВИМС, 2009. – С. 40–60.
12. Методические рекомендации. Прогнозирование, поиски и оценка урановых месторождений в палеоруслах. – М., 1999. – 153 с.
13. Нестеров И. И. Тайны рождения нефти // Знание, Москва, 1969. – 46 с.
14. Плуман И. И. Ураноносность черных битуминозных аргиллитов верхнй юры Западно-Сибирскойплиты // Геохимия, 1971. – № 11. – С. 1362–1368.
15. Соболев И. С., Чернев Е. М. Отражение глубинного строения юго-восточной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции в элементном составе осадочных пород дневной поверхности. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – М.: ВНИИОНГ, 2010. – № 3. – С. 21–29.
16. Сурков В. С., Коробейников В. П., Краевский Б. Г. Геостатические тектонические карты раннего (докембрий и палеозой) и позднего (мезозой и кайнозой) неогея территории Сибири масштаба 1 : 2 500 000. Объяснит. Записка. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1998. – 94 с.

17. Учителева Л. Г. Минеральные воды Западно-Сибирского артезианского бассейна. Москва. «Недра», 1974. – 163 с.
18. Чернев Е. М. Обнаружение урана гидрогенного типа юго-восточной части Западно-Сибирского региона на основе профильных геохимических исследований // Проблемы геологии и освоения недр: Сборник докладов XII Международного симпозиума им. акад. М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященный 100-летию первого выпуска горных инженеров в Сибири и 90-летию создания Сибгеолкома в России – Томск, ТПУ, 14–17 апр. 2008. – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – С. 193–195.
19. Язиков В. Г. Чу-Сарысуйская и Сырдарьинская урановорудные провинции – условия локализации и перспективы обнаружения новых урановых руд // Второй международный симпозиум. Уран: ресурсы и производство. Москва, 26–28 ноября 2008 г. Сборник трудов. – М.: ВИМС, 2009. – С. 296–306.
20. Adams S. S. and Saucier A. E. Geology and recognition criteria for uraniferous humate deposits Grants Uranium Region, New Mexico, final report 1981. Prepared for the U.S. Department of Energy Grand Junction, Colorado, 9–12, 24–59–63, 70–119 pp.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫЯВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ЗОЛОТО-УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ЮГЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ

В. А. Домаренко[1], Р. Ю. Гаврилов[2]

[1]РАЕН viktor_domarenko@mail.ru
[2]Томский политехнический университет
Томск, Россия, gavrilovroman9@mail.ru

PROSPECTS FOR DETECTING COMPLEX GOLD-URANIUM DEPOSITS IN THE SOUTH OF CENTRAL SIBERIA

V. A. Domarenko[1], R. Yu. Gavrilov[2]

[1]RANS viktor_domarenko@mail.ru
[2]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, gavrilovroman9@mail.ru

Currently, the IAEA widely applies the classification of industrial types of uranium deposits based on the use of leading characteristics. The most commonly used ones are: unconformity type (vein-like), sandstone type (sandstones), paleoconglomerates, intra-intrusive (porphyry), volcanogenic, surface (calcarets), and some others. The deposits of dissent have gained great appeal as a complex gold-uranium and gold-platinoid (with or without uranium). Relatively new for the framing of the Siberian craton is the gold-uranium objects, conditionally assigned by us to the "Carlin" type in substantially carbonate deposits of the Late Riphean age.

Введение

В мировой практике применяется классификация промышленных типов урановых месторождений основанная на использовании ведущих признаков. Наиболее часто употребляемые из них: тип несогласия (жилообразный), песчаниковый тип (песчаники), палеоконгломераты, внутриинтрузивные (порфировые), вулканогенные, поверхностные (калькреты) и некоторые другие. По разведанным запасам промышленной категории (80 долл./кг урана) по месторождениям Мира (без Европы и СССР) на 2017 г. главную роль играли песчаники 28,5 %, жилообразные (тип несогласия) – 24,5 %, в вулканитах – 15,5 %, в древних конгломератах – 15,5 %, в интрузивных и метаморфических породах – 12,2 %, другие – 3,5 %. В последние годы тип несогласия приобретает все возрастающее значение, так по добыче урана это соотношение следующее: тип несогласия – 42,7 %, песчаниковый – 21,3 %, жильный – 15 %, гранитный – 7 %, конгломератовый – 5,1 % [1, 7, 9].

В настоящее время месторождения несогласия получили еще большую привлекательность, как комплексные золото-урановые и золото-платиноидные (с ураном или без него), особенно в Северной Австралии (геосинклиналь Пайн-Крик). В этой провинции известно свыше 20 золотых и золото-платиноидных месторождений и каждые 2 года открывается новое с запасами в десятки тонн золота. При этом радиационные методы поисков могут быть использованы для обнаружения и оценки этих месторождений.

Материалы и методы

Центрально-Сибирский регион объединяет исторически и социально-экономически взаимосвязанные Красноярский край, включая Таймырский и Эвенкийский автономные округа, республики Хакасия и Тыва, располагается в самом центре России на пересечении речных, железнодорожных и авиационных линий и характеризуется, особенно в центральной части, развитой энергетикой, перерабатывающей и машиностроительной промышленностью.

По современным представлениям описываемая часть Сибири является аккреционно-коллизионной структурой, образованной на периферии Сибирской платформы в результате эволюции Палеоазиатского океана. Этапы этой эволюции отражены и в геологической истории описываемой территории. Всего для данного участка земной коры выделяется 5 этапов развития, овеществлённых в структурно-вещественных комплексах (СВК) [8]:

1. Этап, завершённый метаморфизмом зеленосланцевой ступени (R_3).
2. Поздний рифей-вендский этап формирования карбонатных толщ в шельфовом бассейне.
3. Венд-раннекембрийский и среднекембрийский магматизм и сопутствующее осадконакопление.
4. Позднекембрийско-раннеордовикский коллизионный этап.
5. Раннедевонско-пермский рифтогенез

Анализ геологических обстановок южного обрамления Сибирской платформы, включающего Алтае-Саянскую складчатую область и Енисейский кряж, позволяет с уверенностью констатировать, что на этой территории возможно обнаружение месторождений ведущих геолого-промышленных типов, в том числе металлоносных конгломератов с ураном и золотом, объектов «типа несогласия», а также типа Карлин в разновозрастных песчаниково-карбонатных толщах.

Результаты и обсуждение

1. Металлоносные конгломераты

Распределение золотоносных и урановых конгломератов во времени можно охарактеризовать следующим образом:

Фанерозой: главным образом золотая минерализация с немногочисленными предполагаемыми концентрациями урана; промышленный потенциал гораздо ниже, чем у протерозойских конгломератов.

Верхний протерозой: явное отсутствие вообще каких-либо значительных месторождений золота или урана в конгломератах возрастом 700–1600 млн. лет.

Средний протерозой: очень ограниченное развитие золотоносных конгломератов в период 1600–2200 млн. лет назад, урановой минерализации не известно; наиболее распространенные рудные минералы – обломочные окислы железа, а не сульфиды железа; золотоносные конгломераты фактически исчезают сразу после завершения формирования глобально распространенных железистых кварцитов; оптимальное время для минерализованных конгломератов типа Тарква.

Нижний протерозой: широко распространены золотоносные и урановые конгломераты; фации с промышленными рудами очень ограниченны и по латерали, и по вертикали; обломочные золото, уранинит и пирит – характерные компоненты матрицы конгломератов; в отложениях возрастом 2200–2500 млн. лет концентрации урана явно преобладают над концентрациями золота, но в более древних слоях (2500–3100 млн. лет) концентрации золота возрастают; оптимальное время для минерализованных конгломератов гуронского и витватерсрандского типов.

Архей: очень ограниченное развитие золото- и урановых конгломератов с пиритом в завершающую стадию формирования зеленокаменных поясов; эти архейские образования с трудом отличимы от наиболее ранних нижнепротерозойских.

В пределах южного обрамления Сибирской платформы мы прогнозируем обнаружение металлоносных конгломератов в среднепротерозойских конгломератах Енисейского кряжа, Пезасского горста Кузнецкого Алатау и на Анабарском щите [4, 5, 6].

2. Месторождения в зонах структурно-стратиграфического несогласия

Если исходить из аналогии с известными месторождениями Австралии и Канады, то при выборе районов для поисков месторождений «типа несогласия» в Центрально-Сибирском регионе наиболее подходят Анабарский щит, Енисейский кряж и Протеросаян, в пределах которых субплатформенные образования позднего протерозоя представлены красноцветными и пестроцветными плохо отсортированными конгломератами, песчаниками, алевролитами, с резким несогласием залегающими на архейско-раннепротерозойском фундаменте. В фундаменте распространены горизонты хорошо проводящих черных графитсодержащих сланцев и гранито-гнейсовые купола. Терригенные толщи субплатформенного чехла залегают на коре выветривания пород фундамента (реголите). Активизационные процессы выражены в широко проявленной тектономагматической деятельности.

Ранее проведенными работами в области развития зон ССН подтверждено развитие урановорудного процесса. Так в породах фундамента выявлены месторождения Осиновское, Кременецкое, рудопроявления Кутукасское, Ясное, Полярное, Кедровое, Оленье (Енисейский кряж), Безымянное, Меридиональное, Рденское (Восточный Саян). Из сопутствующих отмечается медь до 1 %, золото 1–29 г/т (Кедровое, Оленье, Кременецкое месторождения).

Проведенные в Центрально-Сибирском регионе работы позволяют рассматривать в качестве перспективных на выявление богатого уранового оруденения в связи с зонами ССН и другими благоприятными геолого-структурными обстановками Кутукасскую и Южно-Енисейскую площади Енисейского кряжа, Манскую и Туманшетскую – Восточного Саяна, а также наименее изученную северо-западную часть Анабарского щита [3, 6, 10].

3. Поверхностные месторождения типа Карлин

Тип «Карлин» представляется нам новым, нетрадиционным для южного обрамления Сибирской платформы.

Наиболее благоприятными структурами для локализации золотого с ураном оруденения типа «Карлин» в обрамлении Сибирского кратона являются существенно карбонатные прогибы позднерифейского возраста – Тейский, Каитьбинский и Горбилокско-Каменский, а также нижнепалеозойские структуры обрамления Тайдонской и Талановской ВТС Мариинской Тайги в северной части Кузнецкого Алатау [2]. Именно эти структуры, по-видимому, ближе всего соответствуют региональной тектонической позиции золоторудных районов США и Китая. Они располагаются в краевой части Сибирской платформы, в области перехода к перикратонному прогибу. Верхнерифейские отложения мощностью до 2000 м ложатся на размытую поверхность нижне- среднерифейских, реже нижнепротерозойских геосинклинальных отложений мощностью до 5000–6000 м. Строго говоря, рифейские отложения не являются типичными терренамии ввиду их относительно малой мощности, хотя местами и характеризуются напряженной линейной складчатостью.

В качестве прямых признаков возможности обнаружения промышленного золотого оруденения в пределах Каитьбинской структуры является открытие геологами ФУГП «Берёзовгеология» Зыряновского проявления, приуроченного к корам выветривания, развитым, скорее всего, по останцам карбонатных пород степановской (?) толщи, перекрывающей сланцы удерейской, погорюйской и горбилокской свит среднего рифея [2, 6].

Другим прямым признаком золотоносности карбонатных отложений верхнего рифея является находка А. К. Мейстером в начале прошлого века [3] в карбонатном разрезе в нижнем течении р. Ангары, ниже устья р. Погромной, в коренном обнажении содержания золота 20 долей на 100 пудов (около 0,6 г/т). По современным представлениям этот разрез относится к отложениям горевской или степановской свит среднего рифея. Подобные точки с повышенными содержаниями золота имеются и в пределах других перспективных площадей.

Не исключено открытие объектов такого типа и в Восточном Саяне, где нами обнаружено проявление «Находка» в карбонатных отложениях кембрия Манского прогиба и Кузнецком Алатау (Богородско-Боголюбовская зона, рудные поля Ключевое и Казанское

При изучении карбонатных и карбонатно-сланцевых разрезов особое внимание следует уделять метасоматитам, подробно описанным в работе Ю. А. Бакулина и др. [1], таким как декарбонатизация, аргиллизация, образование джаспероидов, окварцевание, сульфидизация. Под декарбонатизацией понимается вынос карбонатной составляющей с ее растворением и, как следствие, накопление глинистого и песчано-глинистого материала. Аргиллизация на месторождениях типа «Карлин» не отвечает в должной мере аргиллизитам в их классическом понимании, впрочем, как и другие виды метасоматитов. Процесс образования «аргиллизитов» сопровождает декарбонатизацию и особенно хорошо развит в алевритистых известняках, известково-глинистых сланцах.

Образование джаспероидов, по существу, рассматривается как синоним «окварцевания». Под джаспероидами понимаются интенсивно декарбонатизированные окремнённые породы, содержащие в тех или иных количествах золото. Окварцевание – это такое условное название дано изменению состава пород в результате пассивного увеличения кремнезема при выносе карбонатов. При выделении сульфидизации необходимо определять состав сульфидов, их морфологию, особенно в применении к пириту.

Такие работы позволят выделить золотоносные горизонты, участки, толщи с повышенными концентрациями золота, заслуживающие их дальнейшего изучения по простиранию и на глубину, а также выделение в пределах них кор выветривания, которые, как известно, существенно увеличивают концентрации золота.

Месторождения золота, локализующиеся в корах выветривания различного типа являются вторичными, образованными на золотоносном субстрате, поэтому выявление пород с повышенными содержаниями золота определяют поиски под ними кор выветривания.

В первую очередь следует изучить разрезы карбонатных пород верхнерифейско-кембрийского юго-западного обрамления Сибирского кратона.

Заключение

Анализ геологических обстановок южного обрамления Сибирской платформы, включающего Алтае-Саянскую складчатую область и Енисейский кряж можно с уверенностью констатировать что на этой территории возможно обнаружение месторождений ведущих геолого-промышленных типов, в том числе

металлоносных конгломератов с ураном и золотом, объектов типа несогласия, а также типа Карлин в разновозрастных песчаниково-карбонатных толщах.

Публикация осуществлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований 19-45-700001\19.

Литература

1. Бакулин Ю. И., Буряк В. А., Пересторонин А. Е. Карлинский тип золотого оруденения. – Хабаровск. Из-во ДВИМС, 2001. – 159 с.
2. Домаренко В. А. и др. Перспективы поисков месторождений типа «Карлин» в Енисейской золоторудной провинции // Благородные и редкие металлы Сибири и Дальнего Востока, 2005. – С. 134–135.
3. Еханин А. Г., Домаренко В. А., Молчанов В. И. Золото-урановые с платиноидами месторождения «типа несогласия» и перспективы их обнаружения в Красноярском крае // Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири. – Красноярск: КНИИГиМС, 2000. – С. 133–143.
4. Мейстер А. К. Геологическая карта Енисейского золотоносного района. Описание листа Л-7. Тип. М. Стасюлевича, С. Петербургъ, 1904.
5. Мкртычьян А. К., Шерман М. Л. Геологическая карта Енисейского кряжа. Масштаб 1 : 500 000, 1998.
6. Петров В. Г. Перспективы минерально-сырьевой базы золота Енисейского кряжа. // Состояние и проблемы геологического изучения недр и развития минерально-сырьевой базы Красноярского края. – Красноярск: КНИИГиМС, 2003. – С. 226–230.
7. Тарханов А. В., Бойцов А. В. Уран: ресурсы, производство и потребности. Минеральные ресурсы России. Экономика и управление, 2001. – № 4. – С. 18–24.
8. Сердюк С. С. Золотоносные провинции Центральной Сибири: геология, минерагения и перспективы освоения. – Красноярск: КНИИГиМС, 2004. – 479 с.
9. Хаусен Д. М., Керр П. Ф. Месторождение тонкодисперсного золота Карлин, штат Невада. // Рудные месторождения США, 1973. – Т. 2. – С. 590–624.
10. Masood Ahmad. Geology and mineral deposits of the Pine Creek Inlier and Mc Arthur Basin, Northern Territory. Journal of Australien Geology & Geophysics, 1998. – Vol. 17 (3). – P. 1–17.

ОЦЕНКА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА КОМПЛЕКСНЫХ ЖЕЛЕЗО-РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ РУД БАКЧАРСКОГО РУДНОГО УЗЛА НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

В. А. Домаренко[1], Б. К. Кенесбаев[2], Е. В. Перегудина[2]

[1]МПРиООС
Томск, Россия, viktor_domarenko@mail.ru
[2]Томский политехнический университет
Томск, Россия, kenesbayevbk@gmail.com, pere-elena@mail.ru

ASSESSMENT OF THE RESOURCE POTENTIAL OF COMPLEX IRON-RARE EARTH ORES OF THE BAKCHAR ORE NODE BASED ON COMPUTER MODELING (TOMSK REGION)

V. A. Domarenko[1], B. K. Kenesbayev[2], E. V. Peregudina[2]

[1]MPRiOOS
Tomsk, Russia, viktor_domarenko@mail.ru
[2]Tomsky Polytechnic University
Tomsk, Russia, kenesbayevbk@gmail.com, pere-elena@mail.ru

The purpose of the work is to determine the resource potential of iron-rare-earth ores of the Bakchar ore node based on the use of computer technologies. In the course of the study, the following tasks were performed: – to give the characteristics of the area, the geological structure of the; – to study the regularities of ore formation; – to consider a framework geological and mathematical model of the ore node; – to calculate the resources and reserves of the ore node and associated minerals (phosphorus and REM).

Введение

Бакчарский рудный узел комплексных железо-редкоземельных руд, являющийся составной частью Западно-Сибирского железоносного пояса, располагается в Бакчарском административном районе в 200 км к западу от г. Томска. Площадь рудного узла 1200 км^2 (рис. 1). Географически, район находится на восточном склоне Обь-Иртышского междуречья центральной части Западно-Сибирской низменности.

В геоморфологическом отношении район работ расположен на Обь-Иртышском водоразделе, в долинном комплексе рек Парбиг и Бакчар, левых притоков р. Чаи. Реки типично равнинные, с сильно меандрирующими руслами и малыми скоростями течения.

Площадь работ представляет собой заболоченную и слабо всхолмленную равнину, с абсолютными отметками от 121 м на водораздельных участках до 89 м в речных долинах (рек Галка, Тетеринка, левых притоков р. Бакчар). Территория покрыта лесами, поймы рек заболочены, имеющиеся на территории болота преобладают в южной части района. Лесной покров таёжного типа. Пойменные участки и болота непроходимы для транспорта в летнее время и труднопроходимы зимой.

Климат района континентальный с продолжительной холодной зимой и коротким теплым летом. Среднегодовая температура –0,7 – –1,6 °С. Среднегодовое количество осадков колеблется от 560 до 623 мм. Снежный покров достигает 130 см и держится до начала мая. Максимальная глубина сезонного промерзания наступает в конце марта и достигает 280 см. Преобладают ветры юго-западного и южного направлений.

Наиболее крупные населённые пункты – сёла Бакчар, Чернышевка, Поротниково с населением от первых сотен до 7000 человек. Основное занятие коренного населения – сельское хозяйство. Площадь работ пересекает высоковольтная ЛЭП. Связь с областным центром г. Томском осуществляется автомобильным транспортом по асфальтированным (г. Томск – г. Бакчар) и грунтовым автодорогам. Ближайшая железнодорожная станция «г. Томск» находится в 235 км от участка работ (Рис. 1).

Рудоносная толща по времени формирования занимает промежуток от турона до эоцена и с несогласием залегает на морских песчано-глинистых отложениях кузнецовской свиты (сеноман-турон). Перекрывается она морскими глинистыми отложениями люлинворской свиты (эоцен).

Продуктивные отложения Бакчарского рудного узла приурочены к трем стратиграфическим уровням песчаным толщам позднемелового, палеоценового и эоценового возраста: нарымскому (сантон), колпашевскому (маастрихт) и бакчарскому (палеоцен-эоцен) горизонтам. Рудоносная толща сложена прибрежно-морскими и морскими осадками, содержащими горизонты оолитовых железных руд: песчаниками кварц-хлорито-сидеритового, кварц-

Рис. 1. Обзорная карта района Бакчарского железорудного узла

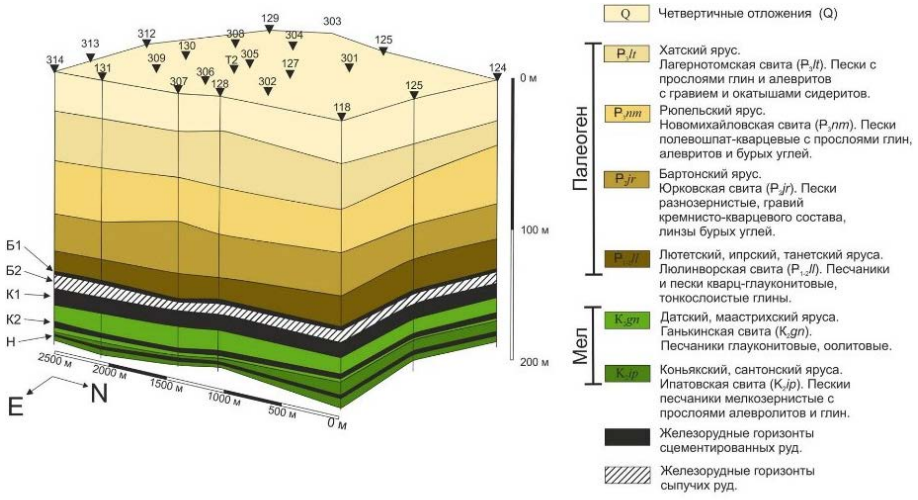
хлорито-глинистого состава, алевролитами, глинами, песками, гравелитами. Оолитовые железные руды отнесены к трем горизонтам, (снизу вверх) нарымскому, колпашевскому и бакчарскому. Руды залегают горизонтально с едва заметным погружением их к востоку и северу. Железорудная толща Бакчарского узла представлена восемью пространственно разобщенными рудными телами (Рис. 2).

В этих отложениях возникали условия, благоприятные для формирования различных полезных ископаемых. Имеются признаки возможного размещения фосфоритов, руд цветных металлов, алмазов. Промышленное значение могут иметь редкоземельные фосфаты, которые придают рудам комплексный характер. Признаки фосфоритоносности характерны для всех железорудных отложений. Это тонкие прослои карбонатно-фосфористых песчаников среди пород железорудного колпашевского горизонта желваки и стяжения фосфоритов фосфоритовых песчаников в нижней части разреза бакчарского горизонта. Песчаники с повышенным содержанием пятиокиси фосфора имеют, как правило, слабо выраженную оолитовую структуру. Содержание пятиокиси фосфора в таких песчаниках от 2,6–3,9, а иногда до 6,9 % [1–6, 8, 10, 11, 13, 14].

Методы и результаты исследований

Оценка прогнозных ресурсов железных руд Бакчарского рудного узла по категориям P_1 и P_2 выполнена в контурах Бакчарского лицензионного участка (530 км^2) и в контурах рудного узла (1200 км^2) для всех типов железных руд (рыхлых и разной степени сцементированных) методом геолого-математического моделирования с построением блочной модели при помощи программного продукта «MicroMine».

Согласно Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых [7] и Методическим рекомендациям по применению Классификации запасов к месторождениям железных руд [9,], руды Бакчарского узла,



Бакчарский верхний (Б1) - железоносный горизонт оолитов гидрогетитового состава с сидеритовым цементом.
Бакчарский нижний (Б2) - железоносный горизонт оолитов гидрогетитового состава с отсутствием цемента.
Колпашевский верхний (К1) - железоносный горизонт оолитов гидрогетитового состава с хлористо-глинистым цементом.
Колпашевский нижни (К2) - железоносный горизонт оолитов гидрогетитового состава с гидрослюдистым цементом.
Нарымский (Н) - железоносный горизонт оолитов гидрогетитового состава с сидерит-хлоритовым цементом.

Рис. 2. Блок-диаграмма геологического строения участка

Таблица 1. Показатели изменчивости основных свойств оруденения для определения группы сложности геологического строения

Коэффициент рудоносности $К_р$	0,86
Показатель сложности q	0,77
Коэффициент вариации мощности V_m	39,8 %
Коэффициент вариации содержания железа V_c	18,2 %

характеризуются относительно сложным строением и достаточно выдержанным качеством руд, соответствует месторождениям 2-й группы сложности геологического строения [12].

Выделение рудных тел основано на результатах опробования.В Нарымском горизонте оконтурено рудное тело «Н» сцементированных руд. В Колпашевском горизонте выделены два рудных тела «К1» и «К2», сложенных сцементированными рудами. В составе Бакчарского горизонта оконтурены два рудных тела, сложенные сцементированными рудами «Б1» и рыхлыми железными рудами «Б2» (рис. 3).

Объём руды определялся как произведение площади блока на его среднюю мощность. Прогнозные ресурсы определялись путём умножения объёма руды на среднюю объёмную массу руды (табл. 2).

С учетом среднего содержания 33 %, железа – 7 177,4 млн. т.

Рудная масса на площадь 1200 км^2 – 48832,8 млн. т.

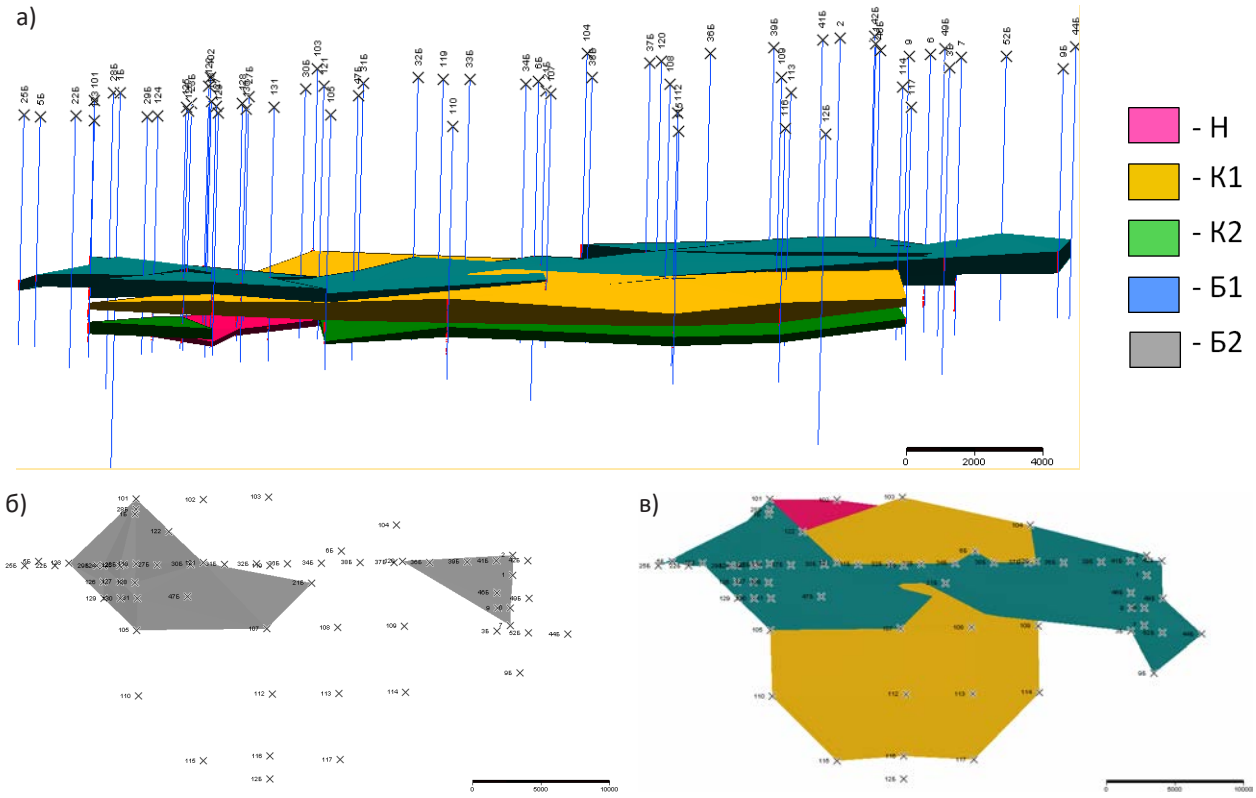


Рис. 3. Блочная модель пространственного расположения железорудных горизонтов в пределах лицензионного участка: а) общий вид; б) рыхлые железные руды; в) сцементированные железные руды

Таблица 2. Результаты подсчета прогнозных ресурсов категории $Р_1$ на Бакчарском лицензионном участке

Рудное тело	Объем (м^3)	Объемная масса (т/м^3)	Рудная масса (млн. т)	Ресурсы металла $Р_1$ (млн. т)
Н	438376660,6	2,3	1008,3	675,5
К1	4010936045	2,3	9225,1	3044,3
К2	2345030837	2,3	5393,5	1779,9
Б (рых)	752285445	1,9	1429,3	471,7
Б (сцем)	1961515805	2,3	4511,4	1488,8
∑	9508144793		**21567,8**	**7177,4**

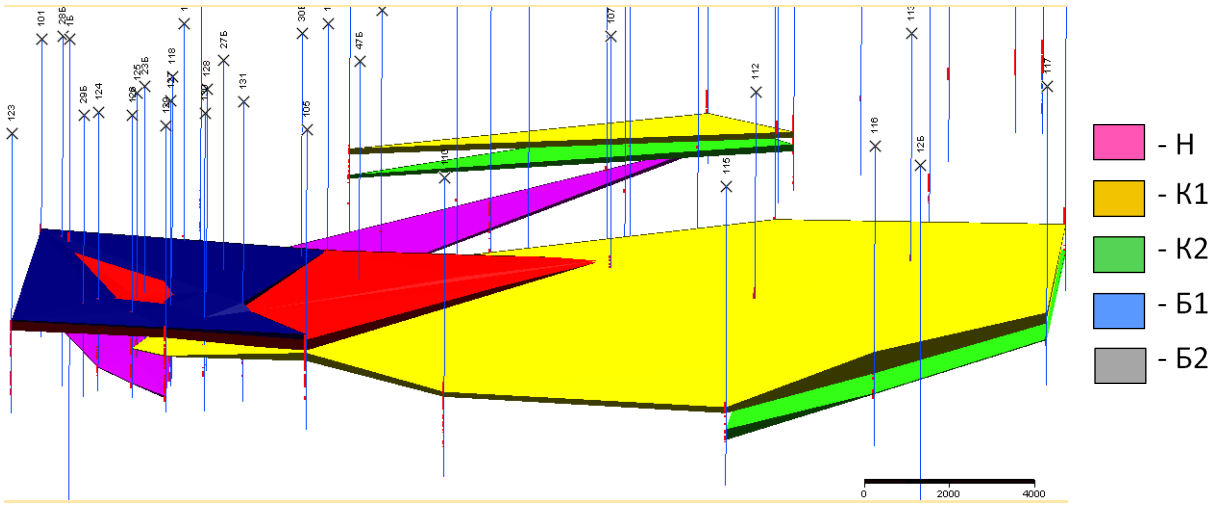


Рис. 4. Пространственное распределение фосфора и РЗЭ в железорудных горизонтах

Таблица 3. Результаты подсчета прогнозных ресурсов фосфора, РЗЭ и церия в Букчарском рудном узле

	Содержание, %	Ресурсы металла P_1 (млн. т) (530 км^2)	Ресурсы металла P_2 (млн. т) (1200 км^2)
Фосфор	0,27	13,1	29,6
РЗЭ	0,05	2,4	5,4
Церий	0,03	1,4	3,1

Рис. 5. План подсчетного блока участка «Западный»

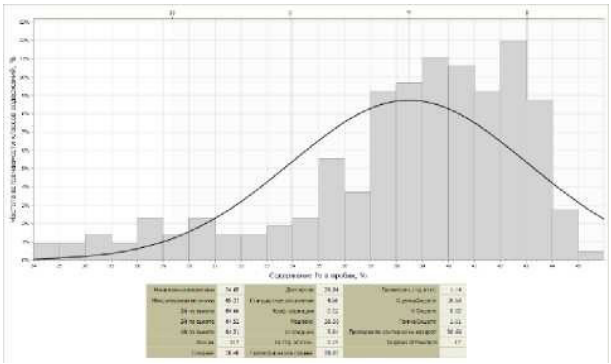


Рис. 6. Гистограмма распределения Fe в рудных телах Б1+Б2

Ресурсы металла категории P_2 на площади Бакчарского рудного узла (1200 км^2) составляют 16250,7 млн. т.

По аналогичной схеме произведена оценка прогнозных ресурсов фосфора, РЗЭ и отдельно церия на данной площади. Построены блочные модели по горизонтам (рис. 4).

Оценка прогнозных ресурсов по фосфору, РЗЭ и церию приведена в табл. 3. Рудная масса составила 4875,9 млн. т.

Подсчет запасов по категории C_2 выполнен на площади 5,8 км^2 участка Западный (рис. 5) при помощи блочного моделирования с интерполяцией запасов геостатистическим методом универсального кригинга. Балансовые запасы были подчитаны по Бакчарскому горизонту. Запасы Колпашевского и Нарымского горизонтов отнесены к категории забалансовых.

Построение блочной модели осуществлялось на основе инструкции «Рекомендации к составу и правилам оформления…» [12]. Блочное моделирование представляет собой процедуру разделения подсчитываемого тела на элементарные блоки заданного

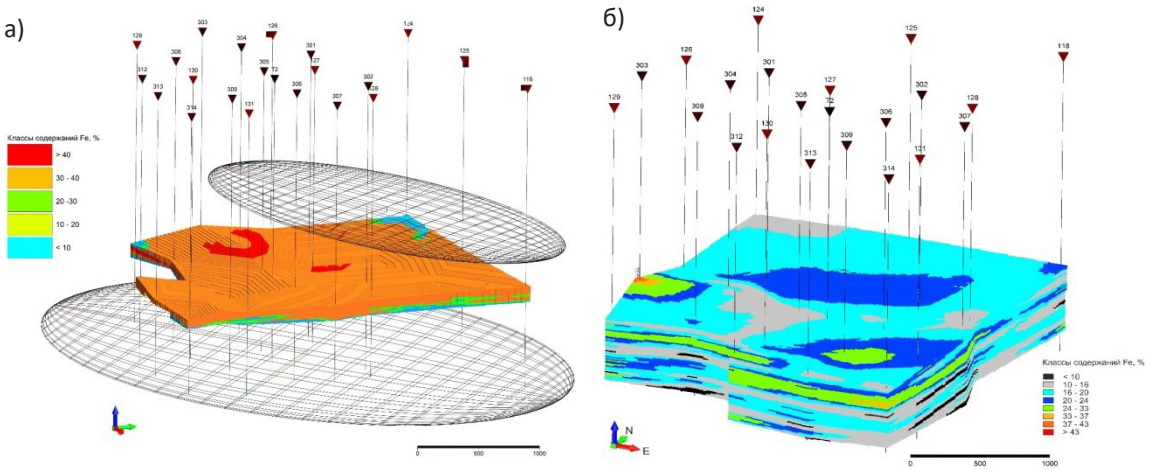


Рис. 7. Интерполированная блочная модель рудных тел: а) Б1 и Б2; б) К1, К2 и Н

Таблица 4. Результаты подсчета запасов Feобщ на участке «Западный»

Рудное тело	Объем (тыс. м^3)	Объемная масса (т/м^3)	Рудная масса (тыс. т)	Среднее содержание Fe (%)	Запасы металла C_2 (тыс. т)	Ресурсы РЗЭ (тыс. т)
Б1	20651	2,4	49562	40,89	20263,86	24,8
Б2	46440	1,9	88236	35,01	30894,38	44,1
К1 + К2 + Н	382607	2	765215	17,3	132087	382,6
∑	449698		**903013**		**183245,24**	**451,5**

размера. Эти блоки могут обладать информацией о среднем содержании полезного компонента, физико-механических свойствах пород и руд.

Геостатистический метод (кригинг) основан на математическом изучении характера изменчивости путем построения вариограмм. Таким образом, для интерполяции запасов кригингом необходимо для начала выяснить существует ли на изучаемом месторождении этот математический закон (случайная функция). Для обнаружения функции изучается изменчивость содержаний полезного ископаемого по трем направлениям осям x, y, z в зависимости от расстояния. Полученный случайный закон используется при интерполяции [6].

Важным показателем возможности использования кригинга является одномодальное распределение полезного компонента в пробах (рис. 6).

На основе анализа пространственного закона распределения полезного ископаемого настроены параметры эллипсоида, которые применены для интерполяции запасов рудных тел Б1 и Б2. Аналогично выполнен подсчет забалансовых запасов по Колпашевским и Нарымскому горизонтам сцементированных руд (рис. 7).

В таблице 4 представлены результаты подсчета балансовых и забалансовых запасов по всем горизонтам участка «Западный».

Заключение

Таким образом, руды Западно-Сибирского пояса отнесены нами к комплексным железо-редкоземельным, что существенно повышает их практическую значимость.

Нами впервые в РФ проведены исследования по возможности РФА анализа для подсчета запасов осадочных железных руд.

Впервые в практике изучения пространственного размещения железоносных горизонтов и их частей, обогащенных фосфором и РЗЭ, Бакчарского рудного узла проведено компьютерное моделирование с применением метода кригинга и выполнен подсчет запасов и ресурсов как основных, так и промышленно значимых попутных компонентов.

Публикация осуществлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований 19-45-700001\19.

Литература

1. Асочакова Е. М., Автореферат дисс. на соискан. ученой степени к.г.-м.н. – Томск: ТПИ, 2015. – 22 с.

2. Белоус Н. Х. Гипергенные морские железорудные поля Средней Сибири и условия их образо-

вания. – Автореферат дисс. на соискан. ученой степени доктора геол.-мин. гаук. – Новосибирск, 1995. – 44 с.
3. Западно-Сибирский железорудный бассейн. – Новосибирск: СО АН СССР, 1964. – 448 с.
4. Домаренко В. А., Маслов С. Г., Сколубович Ю. В., Крауныш С. Д. Предварительные результаты исследований процесса выщелачивания бакчарских руд // Там же. – Т.1. // Минерально-сырьевая база Сибири: история становления и перспективы: Междунар. научно-практич. форум, посвящ. 100-летию выпуска горных инженеров в Сибири и 90-летию Сибгеолкома (10–13 ноября 2008 г., Томск). Т.1. – Томск: ТПУ, 2008. – С. 224–228.
5. Домаренко В. А., Тепляков И. М., Молчанов В. И. Геотехнологические методы разработки железорудных месторождений Западно-Сибирского бассейна. В. сб. «Геология и минеральные Ресурсы центральной Сибири». – Красноярск, КНИИГИМС, 2001. – Вып. 2.
6. Домаренко В. А. и др. Редкие и радиоактивные элементы в железных рудах Западно-Сибирского железорудного пояса на примере Бакчарского узла (Томская область) // Вестник науки Сибири, 2012. – № 5 (6). – С. 29–36.
7. Классификация запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых / Приказ Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 11 декабря 2006 г. – № 278.
8. Кондаков А. Н. Фациально-геохимические особенности и механизм оолитообразования осадочных железных руд Бакчарского месторождения [Текст]: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Томский политехн. ин-т им. С. М. Кирова. – Томск: [б. и.], 1967. – 19 с.
9. Методическим рекомендациям по применению Классификации запасов к месторождениям железных руд / Министерство природных ресурсов Российской Федерации. – Москва: 2005. – 43 с.
10. Нагорский М. П. Примеси в железных рудах бассейна // Западно-Сибирский железорудный бассейн. – Новосибирск: СО АН СССР, 1964. – С. 340–342.
11. Николаева И. В. Минералого-петрографический состав, условия образования и формационная характеристика железоносных отложений Бакчарского месторождения. – Автореферат дисс. на соиск. уч. степ.к.г.-м.н. – Новосибирск, 1966. – 28 с.
12. Рекомендации к составу и правилам оформления представляемых на государственную экспертизу материалов по технико-экономическому обоснованию кондиций и подсчету запасов твердых полезных ископаемых с использованием блочного моделирования на месторождениях различного морфологического типа. – Москва, 2014.
13. Рудмин М. А. Автореферат дисс. на соиск. уч. степ.к.г.-м.н. – Томск, ТПУ, 2016. – 28 с.
14. Тепляков И. М., Домаренко В. А., Молчанов В. И. Железорудная база XXII века (будущее делается сегодня) // Минерально-сырьевая база Сибири: история становления и перспективы: Междунар. научно-практич. форум, посвящ. 100-летию выпуска горных инженеров в Сибири и 90-летию Сибгеолкома (10–13 ноября 2008 г., Томск). – Т. 1. – Томск: ТПУ, 2008. – С. 254–266.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УРАНА И ТОРИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Г. М. Есильканов[1], Е. Г. Язиков[2], Е. З. Шакенов[1], Н. Ж. Мухамедияров[1], М. Т. Дюсембаева[1], А. Ж. Ташекова[1], В. В. Колбин[1], А. Е. Темиржанова[1], А. О. Айдарханов[1]

[1]Института радиационной безопасности и экологии
Курчатов, Казахстан, al-g_007@mail.ru
[2]Томский политехнический университет
Томск, Россия, yazikov@tpu.ru

GEOCHEMICAL FEATURES OF URANIUM AND THORIUM DISTRIBUTION IN GROUNDWATER OF THE SEMIPALATINSK TEST SITE

G. M. Yessilkanov[1], E. G. Yazikov[2], Ye. Z. Shakenov[1], N. Zh. Mukhamediyarov[1], M. T. Dyussembayeva[1], A. Zh. Tashekova[1], V. V. Kolbin[1], A. Ye. Temirzhanova[1], A. O. Aidarkhanov[1]

[1]Institute of Radiation Safety and Ecology
Kurchatov, Kazakhstan, al-g_007@mail.ru
[2]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, yazikov@tpu.ru

The prevalence of thorium and uranium in groundwater of different composition and mineralization in the territory of the Semipalatinsk test site (STS) was studied. The studied waters are diverse in chemical composition: 14 % of the samples had a hydrocarbonate, 69 % – sulfate and 17 % – chloride types. The dependence of the uranium increase in the water with increasing salinity for sulfate, and chloride waters and its reduction in the hydrocarbonate waters was revealed. Uranium concentration in the STS groundwater exceeds clarke values for groundwater of hypergenesis zone (HZ) and continental salinity zone (CSZ) by 15 and 5 times respectively.

Введение

Естественные радионуклиды, такие как торий и уран, являются основными источниками природной радиоактивности подземных вод. Изучение данных элементов важно для мониторинга эксплуатируемых, рекультивируемых или закрытых урановых рудников [7, 9]. Кроме того, остается актуальным уточнение уровней концентраций урана и тория в водах разного состава [1].

Целью данного исследования было изучение геохимических особенностей поведения урана и тория в подземных водах СИП.

Материалы и методы

Территория Семипалатинского испытательного полигона находится в северо-восточной части Казахстана, в восточной части Казахского мелкосопочника, в условиях холодного полуаридного степного климата [2, 8].

Всего изучено 60 колодцев и скважин. Отбор проб проводился в 2017 году (весенний, летний, осенний периоды) в соответствии с ГОСТ 17.1.5.05-85. Всего отобрано 179 проб воды.

Определение pH воды проводилось на месте отбора с помощью прибора Марк 901.

Исследование содержания кальция, сульфатов, гидрокарбонатов, хлоридов и общей жесткости проводилось титриметрическими, колориметрическими, потенциометрическими и гравиметрическими методами [3].

Содержание U, Th определялось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе Agilent 7700x [11].

Статистическая обработка материала проводилась с помощью программ MS Excel 2010 и Statistica 10.

Результаты и их обсуждение

Величина pH для изучаемых вод изменяется в диапазоне 6,2–9,0; среднее значение для всех преобладающих типов вод составляет 7,6. В среднем по установленным уровням pH воды изученных подземных вод можно отнести к слабощелочным.

Изученные подземные воды СИП представляют собой колодцы и скважины, которые существенно различаются по условиям миграции урана и тория. По химическому составу и преобладающим ионам изучаемые воды относятся к водам гидрокарбонатного-натриево-магниевого, сульфатного-натриево-магниевого, сульфатного-натриево-кальциевого и хлоридный-натриево-магниевого состава. По распространённости подземные воды СИП образуют следующий убывающий ряд:

Сульфатные (69 %) > Хлоридные (17 %) >
> Гидрокарбонатные (14 %)

Полученные данные по макрокомпонентному составу вод согласуются с литературными источниками, где описаны основные закономерности химического состава подземных вод в зависимости от их минерализации [4, 5, 10].

В таблице 1 представлены данные о распределении тория и урана в изученных водах.

Содержание тория изменяется в широком диапозоне от 0,01 до 1,7 мкг/л, хлоридные воды имеют в среднем более высокие концентрации данного элемента и достигают 0,2 мкг/л. Среднее содержание тория в подземных водах СИП не превышает кларки ЗГ и ЗКЗ. Полученные результаты согласуются с литературными данными о низкой подвижности Th в подземных водах активного водообмена [4].

Концентрация урана в изучаемых подземных водах аналогично изменяется в большом диапазоне. При этом концентрация данного элемента в гидрокарбонатных водах меньше – от 0,5 мкг/л до 28 мкг/л. В сульфатных водах общее содержание урана составляет 25 мкг/л с разбросом от 0,4 до 128 мкг/л. Для хлоридных подземных вод характерно содержание урана на уровне 12 мкг/л.

Содержание урана в подземных водах СИП превышает кларковые значения для вод ЗГ и ЗКЗ в 15 и 5 раз соответственно. Вероятно, одной из причин относительно высоких концентраций урана в воде является засушливый климат исследуемой территории. Согласно работам [4, 6] в подземных водах регионов с аридным климатом, по сравнению с гумидным, зафиксировано повышенное содержание U. Следует отметить, что в условиях аридной климатической зоны с жарким сухим климатом воды активного водообмена отличаются благоприятными условиями для выщелачивания урана [4].

Заключение

Изученные воды существенно различались по химическому составу, хотя и прослеживались схожие условия их формирования. На формирование химического состава природных вод СИП оказывают влияние механизмы испарительного концентрирования и континентального засоления, выщелачивания водовмещающих пород.

Подземные воды на территории СИП имеет разнообразный химический состав, на всех изученных участках встречаются воды гидрокарбонатного, сульфатного и хлоридного типов. Важно отметить, что большинство водоисточников имеют слабощелочные воды сульфатного типа. Результаты проведенных исследований показали, что изученные воды характеризуются низкими концентрациями тория относительно кларков подземных вод ЗГ и ЗКЗ. Содержание урана, наоборот высокое относительно обоих кларковых значений.

Таблица 1. Содержание тория и урана в подземных водах СИП, мкг/л

Элемент	Тип воды			Среднее содержание в подземных водах			ПДК [18]
	Гидро-карбонатные n = 23 Me (MAO) (min–max)	Сульфатные n = 115 Me (MAO) (min–max)	Хлоридные n = 41 Me (MAO) (min–max)	Среднее для СИП Me (MAO) (min–max)	ЗГ [10]	ЗКЗ [10]	
Th	0,04 (0,01) / 0,03–0,4	0,05 (0,06) / 0,01–1,7	0,20 (0,16) / 0,03–0,5	0,01 (0,01) / 0,01–1,7	0,24	0,8	–
U	6 (5) / 0,5–28	25 (17) / 0,4–128	12(16) / 0,1–116	20 (18) / 0,1–128	1,31	4,32	30

В числителе – медиана и медианное абсолютное отклонение (MAO), в знаменателе – минимум и максимум; ЗГ – подземные воды зоны гипергенеза; ЗКЗ – подземные воды зоны континентального засоления.

Литература

1. Арбузов С. И., Рихванов Л. П. Геохимия радиоактивных элементов: учебное пособие. – 33е изд., исправленное и дополненное. – Томск: Изд-дво Томского политехнического университета, 2011. – 304 с.
2. Байганов Ж. К. Эколого-геоботаническая характеристика территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона: отчет о НИР (аналитический) / СЦНТИ; рук. Байганов Ж. К. – Семипалатинск, 1998.
3. ГОСТ 26449.1–85. Установки дистилляционные опреснительные стационарные. Методы анализа соленых вод. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 101 с.
4. Посохов Е. В. Общая гидрогеохимия. – Л., «Недра», 1975. 208 с.

5. Ядерная геохимия. Издание 2. Автор(ы):. Титаева Н. А. Издание: Издательство Московского университета, Москва, 2000 г., 336 с.
6. Ayotte J., Gronberg J., Apodaca L. Trace elements and radon in groundwater Across the United States, 1992–2003: Scientific In vestigation report. – Virginia, Reston, 2011. – 115 p.
7. Drozdzak J., Leermakers M., Gao Y., Elskens M., Phrommavanh V., Descostes M. Uranium aqueous speciation in the vicinity of the former uranium mining sites using the diffusive gradients in thin films and ultrafiltration techniques // Analytica Chimica Acta, 2016. – V. 913. – P. 94–103.
8. Kottek M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel, 2006: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorol. Z., 15, 259-263. doi:10.1127/0941-2948/2006/0130.
9. Pandit P., Mangala P., Saini A., Bangotra P., Kumar V., Mehra R., Ghosh D. Radiological and pollution risk assessments of terrestrial radionuclides and heavy metals in a mineralized zone of the siwalik region (India) // Chemosphere, 2020. – V. 254. – 126857.
10. Shvartsev S. L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the earth // Geochemistry International, 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
11. Water quality. Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICPMS) P. 2: Determination of 62 elements. ISO 172942:2003 (E). – Switzerland, 2003. – 30 p. URL: https://www.iso.org/standard/36127.html (дата обращения 26.08.2017).

УРАН-ТОРИЕВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ГРАФИТОВЫХ РУДАХ БОТОГОЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

С. М. Жмодик[1], Е. В. Айриянц[1], Д. К. Белянин[1], Э. О. Бабаяков[1], А. Г. Миронов[2], Т. Н. Мороз[1], В. А. Пономарчук[1], А. Н. Пыряев[1]

[1]Институт геологии и минералогии СО РАН
Новосибирск, Россия, zhmodik@igm.nsc.ru
[2]Геологический институт им. Н. Л. Добрецова БНЦ СО РАН
Улан-Удэ, Россия

URANIUM AND THORIUM MINERALIZATION IN GRAPHITE ORES OF BOTOGOL DEPOSIT

S. M. Zhmodik[1], E. V. Airiyants[1], D. K. Belyanin[1], E. O. Babayakov[1], A. G. Mironov[2], T. N. Moroz[1], V. A. Ponomarchuk[1], A. N. Pyryaev[1]

[1]Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
Novosibirsk, Russia, zhmodik@igm.nsc.ru
[2]N. L. Dobretsov Geological Institute of the BNC SB RAS
Ulan-Ude, Russia

The unique Botogol deposit of graphite is located in the central part of East Sayan. The study of radioactive samples of the graphite ore made it possible to compare the age of uranium-thorium mineralization with existing dating for alkaline rocks of the Botogol massif containing ores. In this paper, the features of the uranium-thorium mineralization of graphite ores represented by the thorianite and a thorite of two generations are considered.

Введение

В природе распространены два генетических типа месторождений графита: 1 – метаморфогенный, с формированием графита в результате преобразования биогенного вещества при повышенных P–T условиях и 2 – ассоциирующий с магматическими расплавами, с образованием графита за счет C–O–H флюидов. Для второго типа характерно, более высокое качество руд, но меньшие запасы по сравнению с метаморфогенным. Ботогольское месторождение графита расположено в центральной части Восточного Саяна. Месторождение приурочено к массиву щелочных и нефелиновых сиенитов, прорывающему иркутную толщу венд-кембрийских мраморированных карбонатов с прослоями черных (углеродистых) кремнистых и глинисто-кремнистых сланцев. Известняки в виде крупных ксенолитов встречаются в самом массиве, к которым часто приурочены скопления графита в виде штоков [1]. Состав и текстура графита в рудных штоках разнообразны. Наиболее качественные руды (60–90 % углерода) сложены плотнокристаллическим графитом и имеют массивную текстуру. Наряду с этим в массивных рудах отдельно или в

комбинации встречаются сфероидальные, радиально-лучистые, концентрически-зональные, почковидные, каплевидные, сталактитоподобные, соматоидные и древовидные агрегаты. Различие морфологии графита установлено и на других месторождениях второго типа.

Повышенная радиоактивность определенных разновидностей графитовых руд Ботогольского месторождения впервые была установлена в результате работ Ферганской экспедиции (Всесоюзный институт минеральных ресурсов), Тустукской и Ботогольской партий Бурятского геологического управления в 50-е годы XX века, которые сообщили о точечном появлении радиоактивности [2]. Позднее, начиная с 1981 по 2019 гг. наши детальные исследования уранового и ториевого потенциалов Ботогольского массива выявили участки распространения различных радиоактивных аномалий, связанных с графитовой минерализацией на площади месторождения [3]. В данной работе представлены результаты изучения U–Th минерализации в графитах Ботогольского месторождения, с помощью сканирующей электронной микроскопии и изотопный состав углерода графитов.

Материалы и методы

В ходе экспедиционных работ в течение многих лет был проведен поиск радиоактивных руд с использованием СРП-68-01. При обследовании развалов графитовых руд, извлеченных из штолен и шурфов на поверхность, была отобрана коллекция образцов с повышенной радиоактивностью. Препараты для изучения представляли собой либо выпиленные из образцов пластинки, отполированные с применением алмазных паст, либо фрагменты образцов смонтированные на токопроводящем скотче, с напыленным слоем углерода толщиной до 25 нм. Определение состава минералов проводилось на СЭМ MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding), снабженном системами микроанализа INCA Energy 450+ X-Max 80. Типичные условия анализа: ускоряющее напряжение – 20 кВ; ток зонда – 1,6 нА; живое время набора спектров на образцах от 40 до 120 секунд. При данных условиях измерения разрешение рентгеновского спектрометра составляет 126–127 эВ на линии Mn Ka, а размер зонда – 12 нм. Локальность анализа определяется размером области генерации рентгеновского излучения, которая достигает величины 2–3 мкм. Случайная погрешность определения основных компонентов (C > 10–15 %), обычно не превышает 1 отн. %. Учёт возможных взаимных наложений линий определяемых элементов осуществлялся обычным образом по алгоритмам программного обеспечения INCA Energy. Содержания U, Th и K в пробах керна определялись с помощью лабораторного гамма-спектрометрического анализа по известной методике с пределами обнаружения $1{,}4 \cdot 10^{-7}$ % для U (Ra-226), $3 \cdot 10^{-5}$ % – Th, 0,05 % – K.

Результаты и их обсуждение

Методами гамма-спектрометрии и контрастной радиографии были выявлены содержания U (Ra), Th и их пространственное распределение в графитах (рис. 1 а, б). Кроме графитов с высоким содержание радиоактивных элементов были проанализирована главная разновидность чистых ботогольских графитов, а также битуминозные кристаллические известняки и углеродисто-кремнистые и углеродисто-глинисто-кремнистые сланцы, вмещающие щелочной массив. На графике (рис. 1 б) определенно устанавливается различие трендов в распределении U и Th в высокорадиоактивных графитах, чистых графитах и вмещающих породах.

Радиоактивные минералы в исследуемых образцах графита Ботогольского месторождения представлены торианитом (ThO_2) и торитом ($ThSiO_4$). Они находятся в ассоциации с концентрически-зональными агрегатами, сложенными графитом, клинопироксеном переменного состава эгирин-геденбергитового ряда и роговой обманкой (рис. 2 а). Зерна торианита как правило сильно катаклазированы и корродированы. Их размер достигает 300 мкм. Кубический габитус зерен может угадываться в редких случаях (рис. 2 б). Торианит часто находится в окружении торита, кроме того, образовавшиеся при дроблении торианита трещины также залечиваются торитом. Было встречено одиночное включение торианита в роговой обманке (рис. 2 в). Прямые контакты зерен торианита с графитом или силикатными минералами нехарактерны. Постоянной изоморфной примесью торианита являются U, содержание которого в исследуемых зернах варьирует от 2 до 13 мас. %. В составе торианита отмечается небольшое содержание радиогенного Pb 2–3 мас. %.

Торит в исследуемых образцах представлен более широко чем торианит. В большинстве случаев агрегаты торита контактируют с графитом, однако не редки контакты с клинопироксенами (рис. 3 а). Границы зерен торита имеют ксеноморфный характер. Были встречены прожилки торита, развивающиеся вдоль трещин в клинопироксене (рис. 3 б). Торит обладает непостоянным составом, для него характерны следы метамиктного преобразования. Содержания U и Pb в торите в большинстве анализов ниже предела обнаружения ЭДС, но в некоторых случаях они могут достигать первых массовых процентов для U и десятых долей процента для Pb. По характеру поверхности зерен и их составу можно выделить две разновидности торита – 1 обладающий кавернозной поверхностью метамиктный торит, содержащий большее количество Th и примесей U и Fe, и 2 – имеющий гладкую поверхность перекристаллизованый торит, содержащий большее количество Si и примеси Ca (рис. 3 в–е).

Силикатные минералы представлены клинопироксеном (эгирин-геденбергитом) и роговой обман-

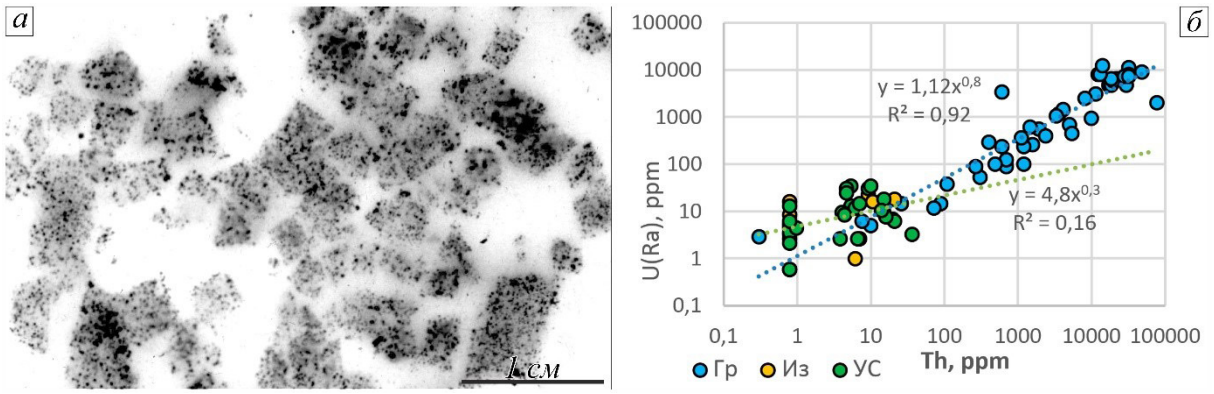


Рис. 1. а – Контрастная авторадиограмма, фиксирующая пространственное распределение урана и тория в срезе образца Ботогольского графита; максимальная плотность почернения соответствует торианиту (с ураном) иториту. б – Распределение урана и тория в образцах радиоактивного графита Ботогольского месторождения; Гр – графит, Из – известняки и углеродистые сланцы (n = 27) вмещающие массив (УС). Для УС значимый $R^2 = 0,145$

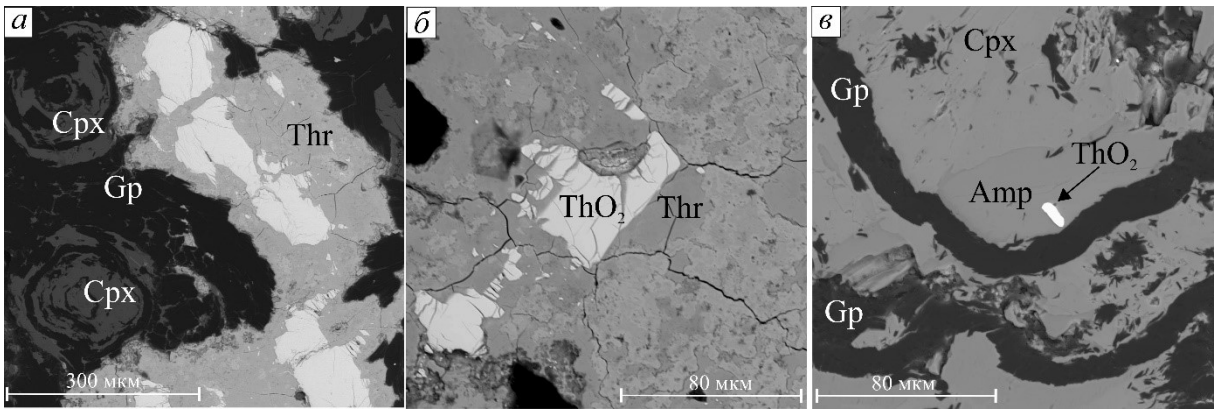


Рис. 2. а) концентрически-зональные агрегаты клинопироксена с графитом и срастание торианита и торита в графитовой основной массе; б) катаклазированные зерна торианита в окружении торита; в) включение торианита в роговой обманке

Cpx – клинопироксен, Amp – амфибол; Thr – торит; ThO_2 – торианит, Gp – графит.

кой. В редких случаях встречаются биотит и альбит. Отмечаются многочисленные включения чешуек графита (рис. 4). В отдельных случаях включения графита имею каплевидную форму (рис. 4 б). Для силикатных минералов характерно тесное срастание с графитом. Во многих случаях срастание силикатных минералов с графитом имеет причудливую ажурную почковидную корково-скорлуповатую текстуру. На границе срастания чешуйки графита имеют более идиоморфный вид по сравнению с силикатами. Кроме того, силикатные минералы встречаются в виде тонких прожилков в интерстициях между зернами графита (рис. 4 в).

По данным Рамановской спектроскопии, характерной особенностью графита с серо-металлическим оттенком является, повышенная упорядоченность кристаллической структуры и несколько пониженный уровень температуры его образования (~ 540 °C), по сравнению с черным графитом, для которого определена температура формирования ~ 570 °C. широкий разброс $\delta^{13}C$ в графитах, характеризующий изотопную неоднородность руды, отмечается между разными участками графитов из Карнельевского штока (северная часть Ботогольского месторождения). По результатам исследования нашей коллекции $\delta^{13}C$ укладывается в интервал –4 ÷ –10 ‰. Принимая в расчет данные [4], общий интервал $\delta^{13}C$ графита на Ботогольском месторождении существенно увеличивается и составляет – +4 ÷ –23 ‰.

Результаты предыдущих исследований изотопного состава графита выявили широкую вариацию значений $\delta^{13}C$ и указывают как минимум на три источника углерода: биогенный, мантийный, карбонатный и многократное переотложение графита на магматической стадии в сильно восстановительной обстановке: $CaCO_3 \rightarrow CO_2 \rightarrow$ реакция Будуара $\rightarrow$ C (графит) [5].

Возрастные датировки, полученные для нефелиновых сиенитов, могут быть сопоставлены с датировкой U–Th минерализации встречающейся в графито-

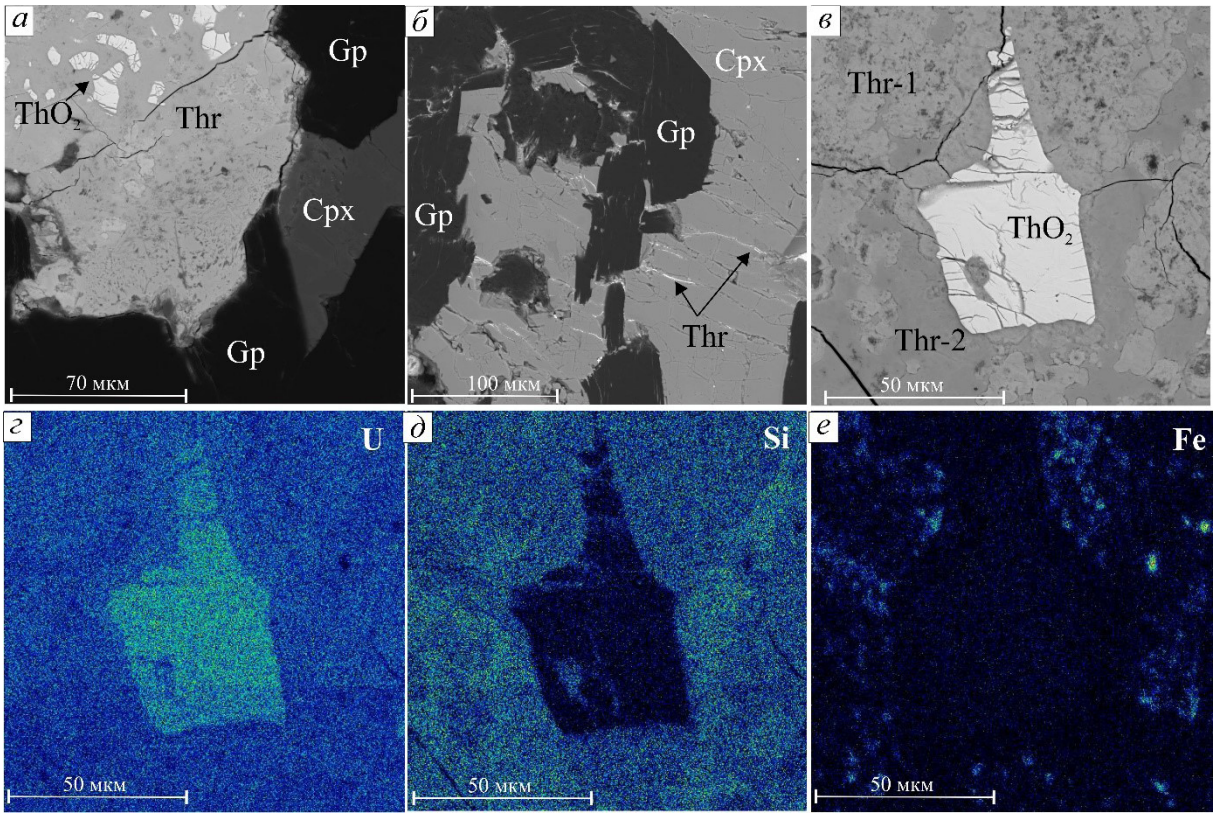


Рис. 3. а) Пятнистый агрегат торита, содержащий катаклазированный торианит, на контакте с зернами графита; б) клинопироксена и прожилки торита заполняющие трещины в клинопироксене; в) пятнистый агрегат торита двух разновидностей, содержащий катаклазированный торианит

Cpx – клинопироксен, Thr – торит; ThO_2 – торианит, Gp – графит.

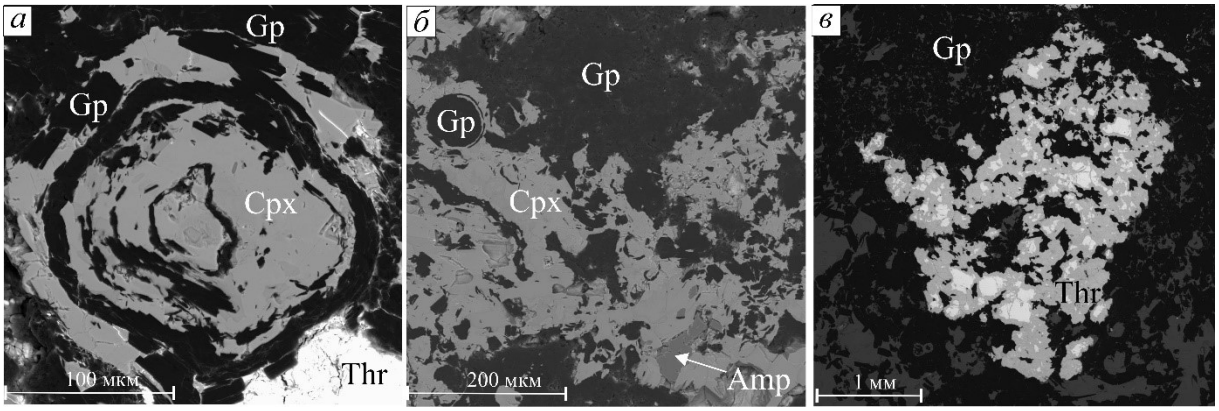


Рис. 4. Концентрически-зональный агрегат клинопироксена (Cpx) и графита (Gp) (а); капля графита в Cpx и мозаичное срастание Cpx с Gp; торианит (ThO_2), замещаемый торитом (Thr) в графите. Amp – амфибол

вых рудах. Rb–Sr изохронный возраст формирования полевошпатового ийолита Ботогольского массива определен 492 ± 11 млн. лет [6]; K–Ar-методом по биотитам из нефелиновых сиенитов Ботогольского массива определен возраст 521 и 492 млн. лет [7]. Средняя оценка возраста торианита находящегося в ассоциации с концентрически-зональными агрегатами, сложенными графитом, эгирин-геденбергитом и роговой обманкой, по данным СЭМ-ВДС составляет 512 ± 19 (n = 27) млн. лет [6]. В этой работе представлены данные изучения U–Th минерализации графитовой руды Ботогольского месторождения с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Заключение

В результате комплексного исследования уранториевой минерализации в графитах можно говорить об их формировании на магматической стадии одновременно с кристаллизацией щелочных пород Ботогольского массива. Соотношения содержаний

U, Th, Th/U и изотопный состав углерода в графитах и породах, вмещающих массив, свидетельствуют о поступлении глубинного углерода, кроме биогенного и карбонатного. О возможности поступления с мантийными расплавами урана и тория свидетельствуют данные авторадиографии (рис. 1 а), на которых фиксируются структуры распада, кубических фаз, состоящие из графита и идиоморфных кубических микрокристаллов торианита и уранторианита. На этой основе, можно предполагать, что исходным соединением могли быть высокотемпературные соединения урана и тория с углеродом, для которых характерна кубическая сингония [9, 10].

В результате изучения радиоактивных руд Ботогольского месторождения с помощью сканирующей электронной микроскопии было установлено что уран-ториевая минерализация представлена торианитом и торитом. В составе торианита отмечаются постоянные изоморфные примеси U, а также примеси радиогенного Pb. Относительная устойчивость торианита позволила провести оценку его возраста по данным СЭМ-ВДС – средняя оценка возраста составляет 512 ± 19 (n = 27) млн. лет [8]. Эта оценка в полной мере может быть сопоставлена с результатами датирования, полученными для щелочных пород Ботогольского массива 492 ± 11 млн. лет [6] и 521 и 492 млн. лет [7]. Торит судя по химическому составу и структуре поверхности зерен представлен двумя генерациями: 1 – метамиктный торит с повышенным содержанием Th, U, а также примесью Fe за счет мелких вкраплений гидрооксида Fe; 2 – перекристаллизованный торит с повышенным содержанием Si и Ca.

Авторы выражают благодарность В. И. Притчиной за помощь в сборе образцов в ходе экспедиционных работ. Работы выполнены в «ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН» в рамках государственного задания ИГМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Литература

1. Солоненко В. П. Боготольское месторождение графитов и перспективы его использования / В. П. Солоненко, В. С. Соболев, Г. П. Славнин, Н. А. Флоренсов. – Иркутск: ОГИЗ, 1947 – 218 с.
2. Мочульский Н. В. Систематизация и анализ результатов радиометрических исследований, проведенных Ферганской экспедицией в Восточном Саяне в 1950–55 гг. / Н. В. Мочульский, А. И. Сулоев. – Иркутск: Сосновская экспедиция, 1957. – 121 с.
3. Mironov A. G. Native, radiactiv, and sulfide mineralization at the Botogol graphite deposite (East Sayan) / A. G. Mironov, V. A. Mironov, S. M. Zhmodik, Yu. Ch. Ochirov // Russian Geology and Geophysics, 1999. V. 39 (9). – P. 1296–1309.
4. Лобзова Р. В. Графит и щелочные породы района Ботогольского массива / Р. В. Лобзова. – М.: Наука, 1975. – 124 с.
5. Пономарчук В. А. Исследование природы гетерогенности Ботогольского графита / В. А. Пономарчук, С. М. Жмодик, А. Н. Пыряев, Т. Н. Мороз, Д. К. Белянин, Е. В. Айриянц, О. Н. Киселева, А. Г. Миронов // Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы: материалы Всероссийского совещания. – Иркутск, 2015. – С. 127–129.
6. Никифоров А. В. Раннепалеозойский возраст формирования и геодинамическое положение Ботогольского и Хушагольского массивов щелочных пород Центрально-Азиатского складчатого пояса / А. В. Никифоров, В. В. Ярмолюк // Доклады Академии наук, 2007. – № 1 (412). – С. 81–86.
7. Кляровский В. М. О возрасте щелочных пород восточной части Восточного Саяна / В. М. Кляровский, В. П. Костюк // Докл. АН СССР, 1965. – Т. 162 (2). – С. 405–407.
8. Белянин Д. К. Применение сканирующей электронной микроскопии с использованием энерго- и волнодисперсионного спектрометров для химического датирования уран-ториевой минерализации / Д. К. Белянин, Н. С. Карманов, Е. В. Айриянц, С. М. Жмодик, В. А. Пономарчук // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Международной конференции. – Томск, 2016. – С. 116–120.
9. Ахачинский В. В. Системы урана и плутония с углеродом, кислородом и азотом. Фазовые диаграммы и методы получения / В. В. Ахачинский, С. Н. Башлыков // Атомная энергия, 1969. – Т. 27 (6). – С. 524–532.
10. Котельников Р. Б. Высокотемпературное ядерное топливо / Р. Б. Котельников, С. Н. Башлыков, А. И. каштанов, Т. С. Меньшикова. – М.: Атомиздат, 1969. – 368 с.

РАДИОАКТИВНЫЕ, РЕДКИЕ И БЛАГОРОДНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОДАХ МАССИВА БОГДО (АРКТИЧЕСКАЯ СИБИРЬ)

С. М. Жмодик[1], Е. В. Лазарева[1], Д. К. Белянин[1], А. В. Толстов[2]

[1]Институт геологии и минералогии СО РАН
Новосибирск, Россия, zhmodik@igm.nsc.ru
[2]НИГП «АЛРОСА» (ПАО)
Мирный, Россия, tolstov@mail.ru

RADIOACTIVE, RARE AND PRECIOUS ELEMENTS IN THE ALKALINE ROCKS OF THE BOGDO MASSIF (ARCTIC SIBERIA)

S. M. Zhmodik[1], E. V. Lazareva[1], D. K. Belyanin[1], A. V. Tolstov[2]

[1]Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
Novosibirsk, Russia, zhmodik@igm.nsc.ru
[2]State research enterprise "ALROSA" (PJSC)
Mirny, Russia, TolstovAV@alrosa.ru

The article discusses the results of the study of the distribution of radioactive, rare, and precious elements in the alkaline rocks from the Bogdo intrusion (Arctic Siberia).

Введение

На севере Сибирской платформы, восточнее Анабарского щита, в Уджинской щелочной провинции известно несколько массивов щелочных пород с карбонатитами: Томторский, Богдо, Промежуточный, Буолкалах, Чюэмпэ, Уэле. Массивы располагаются среди карбонатных и терригенных метаморфизованных пород NP1–NP3 возраста и перекрываются континентальными (P), морскими (J) и рыхлыми (Q) отложениями. Положение массивов контролируется меридиональной рифтогенной структурой – «Уджинским сводом» и пересекающими её трансформными разломами. На теневых моделях рельефа и спектрозональных космических снимках положение Томторского и Богдинского массивов подчеркивается кольцевыми структурами, осложненными разломными зонами субширотного и СВ направления. Центральная часть массива Богдо примерно совпадает с геологическим центром крупной кольцевой структуры, которая отчетливо выделяется в магнитном и гравитационном полях.

Массив Богдо расположен в 20–40 км на север от наиболее крупного Томторского массива. Ранее возраст определен K–Ar методом для нефелиновых сиенитов, ювита, мельтейгита, биотита и калишпата – от 338 до 421 млн. лет. Скорректированное на возраст значение $^{87}Sr/^{86}Sr$ равно 0,7043 и сопоставляется с фоидолитами Томторского массива [1, 2]. Данные о распределении радиоактивных (ЕРЭ), благородных (БМ), редких (РЭ) и редкоземельных (REE) элементов, а также возрасте массива Богдо представляют значительный интерес с точки зрения обоснования масштабов распространения комплексного оруденения томторского типа и индикаторной роли ЕРЭ.

В плане массив Богдо имеет форму овала, размерами около 7 × 8 км и характеризуется концентрически-зональным, слабо ассиметричным строением (рис. 1). Массив Богдо может быть отнесен к формации ультраосновных щелочных пород и карбонатитов. Согласно геологического картирования, периферическая часть массива выполнена скарнированными, фенитизированными и мраморизованными известняками. В центральной части массива выделяется блок, сложенный кальцитовыми карбонатитами. Основная площадь массива представлена нефелиновыми сиенитами и ювитами, среди которых в виде полукольцевых участков распространены породы якупирангит-ийолитовой серии и блоки «поздних» карбонатитов.

Материалы и методы

Нами был детально изучен керн (19 образцов) скважины колонкового бурения № 3257,5, вскрывающей на глубине 32–42 м, от поверхности, в разной степени измененные щелочные породы массива.

Породы были исследованы с применением методов петрографии, на микроскопе AxioScope. A1 Zeiss, и сканирующей электронной микроскопии (MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) с системами микроанализа Aztec Energy/INCA Energy 450+XMax 80 и INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd)) (аналитик Н. С. Карманов, ЦКП ИГМ СО РАН). Рентгенофлюоресцентный анализ (РФА) проб проводили на спектрометре ARL-9900XP, ThermoFisher Scientifi с применением программы QuantAS (аналитик Н. Г. Карманова, ЦКП ИГМ СО РАН). Содержания U, Th и K в пробах керна определялись с помощью лабораторного гамма-спектрометрического анализа по известной методике с пределами обнаружения

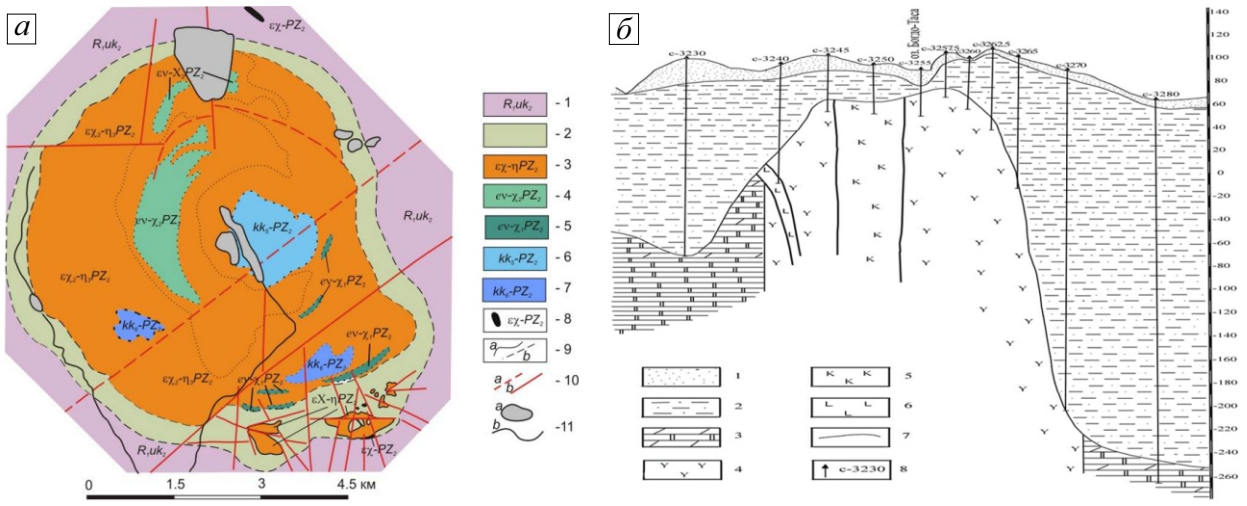


Рис. 1. Схематические геологическая карта и разрез массива Богдо (Анабарский район, Арктическая Сибирь, Россия) (по материалам [3])

1 – улахан-курунгская свита: доломиты с линзами и желваками кремней; 2 – зона скарнирования, фенитизации и мраморизации; 3 – ювиты, нефелиновые сиениты; 4 – метасоматизированные породы якупирангит-ийолитовой серии; 5 – породы якупирангит-ийолитовой серии: якупирангиты, ийолиты мельтейгиты; 6 – ранние кальцитовые карбонатиты; 7 – карбонатиты кальцитовые, доломитовые, анкеритовые; 8 – пикриты, альнёиты; 9 – геологические границы: а) достоверные; б) предполагаемые; 10 – разрывные нарушения: а) достоверные; б) предполагаемые; 11 – а) озера; б) реки. На разрезе: 1 – четвертичные отложения; 2 – отложения Mz возраста; 3 – NP, улахано-курунгская свита: доломиты с линзами и кремневыми конкрециями; 4 – породы якупирангит-ийолитовой серии: якупирангиты, ийолиты-мельтейгиты; 5 – карбонатиты; 6 – нефелиновые сиениты; 7 – геологические границы; 8 – положение скважин колонкового бурения.

1,4 • 10^{-7} % для U (Ra-226), 3 • 10^{-5} % – Th, 0,05 % – K. Многокомпонентный (в том числе U и Th) ИСП-МС анализ, на 35 элементов, выполнен в ЦКП ИГМ СО РАН (аналитики И. В. Николаева, С. В. Палесский) на ИСП-масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT с ультразвуковым распылителем U-5000AT+. Золото и серебро определены химико-атомно-абсорбционным методом (аналитик В.Н. Ильина, ИГМ СО РАН).

Результаты и их обсуждение

В зависимости от количеств КПШ, нефелина, лейцита, эгирина, биотита и изменений, породы имеют различные текстурные и структурные особенности. Макро- и микроскопически щелочные породы массива Богдо представлены: 1 – крупнозернистыми лейкократовыми светло-серой или зеленовато-серой окраски полевошпат-нефелиновые сиениты (рисчорриты) пойкилитовой структуры с пироксеном, биотитом, амфиболом, сфеном; 2 – средне- и 3 – мелко-зернистые темно-серые с красно-коричневыми идиоморфными зернами либенерита (псевдоморфозы серицита по нефелину, представленные микрозернистым серицит-нефелиновым агрегатом), К-Ва-полевым шпатом, меланитом биотит-эгириновые либенеритовые сиениты; 4 – светло-серые пятнистые пойкилитовой структуры карбонатизированные с симплектитами и нефелин-полевошпатовыми агрегатами псевдо-лейцитовые нефелиновые сиениты (ПЛНС). Породы массива Богдо содержат Zr–Nb-рутилы, сложные оксиды и силикаты Ti, Zr, Nb, REE, реже фосфаты – апатит и монацит.

Данные РФА позволяют говорить о том, что уровень содержания кремнезема в породах соответствует группе основных пород (от 49,0 до 52,6 мас. % SiO_2), но с очень высокими концентрациями глинозема (от 20,5 до 23,6 мас. % Al_2O_3) и щелочей (от 12,3 до 17,4 мас. % $Na_2O + K_2O$), с преобладанием калия (8,16–11,4 мас. % K_2O и Na_2O/K_2O = от 0,11 до 0,84), а также низкими содержаниями кальция (от 1,08 до 3,5 мас. % CaO), магния (от 0,27 до 0,78 мас. % MgO) и железа (от 2,52 до 4,2 мас. % FeO_{tot}). Коэффициент агпаитности [(Na + K)/Al] пород первого типа превышает 1 (от 1,0 до 1,13; среднее – 1,10); второго и третьего типа меняется от 0,83 до 1,01 (среднее – 0,9); четвертого – от 0,89 до 0,96 (среднее – 0,93) (рис. 2). На диаграмме SiO_2 – $Na_2O + K_2O$ точки составов соответствуют нефелиновым сиенитам (основным фоидолитам и основным фоидитам по [4] и нефелин-содалитовым кумулатам. На диаграмме Na–Al–K точки составов щелочных пород массива Богдо ложатся на продолжение линий трендов, выявленных для магматических серий массива Nechalacho Layered Suite, возникновение которых объясняется фракционированием расплава [5]. Рисчорриты массива Богдо в полной мере относятся к агпаитовым породам и наиболее близко сопоставляются с рисчорритами Томторского и Хибинского массива. Петрохимической особенностью рисчорритов и либенеритовых нефелиновых сиенитов Богдинского массива, как и Томторского [10], является высокое содержание Al_2O_3 в порода, достигающее 21,3–23,44 мас. %.

Таблица 1. Средние значения содержаний REE (с Y), U, Th, Nb, Ta, Zr, Hf (г/т), Au, Ag (мг/т) и Th/U, Nb/Ta, Zr/Hf, Au/Ag отношений в щелочных породах массива Богдо

Порода	REE_t	U	Th	Nb	Ta	Zr	Hf	Au	Ag	Th/U	Nb/Ta	Zr/Hf	Au/Ag
Р (5)	220	3,7	8,8	118	2,9	384	5,9	42,5	27,8	2,4	40,7	65,1	1,5
ПЛС (2)	208	1,0	2,6	316	12,0	353	5,8	44,0	38,0	1,5	26,3	60,9	1,2
КПЛС (1)	572	3,3	2,8	238	9,4	331	5,2	3,7	29,0	0,9	25,3	63,6	0,1
$ЛС_{ср-с}$ (6)	184	3,4	2,9	113	1,5	557	6,5	9,2	12,0	0,8	76,9	85,7	0,8
$ЛС_{ср}$ (2)	184	4,9	3,4	100	3,9	506	6,7	14,0	5,0	0,7	25,6	75,5	2,8
$ЛС_{сл-с}$ (3)	119	4,4	2,0	62	2,6	314	4,7	21,9	15,0	0,5	23,8	66,8	1,5
Хиб (2)	136	2,0	6,3	104	3,5	226	4,1			3,1	29,6	55,1	

Р – рисчорриты; ПЛС – псевдолейцитовые сиениты; КПЛС – карбонатизированный псевдолейцитовый сиенит; ЛС – либенеритизированные сиениты – с –сильно, ср – средне, сл – слабо; Хиб – кальсилитовые нефелиновые сиениты Хибинского массива [8]; в скобках – число проб.

Таблица 2. Средние значения содержаний (г/т) LREE, HREE, отношений REE, нормированных к хондриту и Eu/Eu* в щелочных породах массива Богдо

	LREE	HREE	La_n/Nd_n	Sm_n/Ho_n	Er_n/Lu_n	La_n/Yb_n	La_n/Lu_n	La_n/Sm_n	Gd_n/Lu_n	Eu*
Р (5)	164,2	18,6	4,44	1,23	1,03	9,17	9,53	8,94	0,86	1,11
ПЛС (2)	176,5	11,6	3,57	2,07	1,47	24,06	26,52	8,61	2,31	0,89
КПЛС (1)	482,3	33,5	2,97	2,12	1,68	22,15	27,42	7,29	2,76	0,98
$ЛС_{ср-с}$ (6)	155,7	8,2	9,63	1,51	0,72	23,96	21,84	24,55	0,73	1,34
$ЛС_{ср}$ (2)	160,7	7,9	9,96	1,67	0,73	24,13	23,94	25,43	0,72	0,81
$ЛС_{сл-с}$ (3)	104,1	4,9	9,56	1,75	0,61	25,34	22,21	24,15	0,69	0,99
Хиб (2)	122,8	5,7	3,50	3,23	1,20	34,58	35,64	8,45	2,24	0,88

На диаграмме MgO–BaO (рис. 2), как и на других, в частности, Rb–Sr, SiO_2–BaO, Th–U, Th–K, U–K (рис. 3) отчетливо наблюдается влияние процессов либенеритизации, карбонатизации и формирования псевдолейцитовых сиенитов на изменение состава рисчорритов. Средние значения содержаний и нормированных отношений REE, редких, радиоактивных и благородных элементов в щелочных породах массива Богдо приведены в таблицах 1, 2.

Распределение LREE (La–Sm) в псевдолейцитовых сиенитов массива Богдо во многом сопоставляется с LREE и нормированными отношениями REE (свидетельствующими о дифференциации легких, средних и тяжелых REE) в кальсильтовых нефелиновых сиенитах Хибинского массива [8]. Для всех пород массива Богдо, за исключением псевдолейцитовых сиенитов и карбонатизированных разностей, характерна слабая дифференциация средних REE и даже накопление тяжелых REE (табл. 2). Содержания U и Th значительно меняются в ПЛС, КПЛС, ЛС, при этом Th/U становится ниже 1, что характерно для пород, формирование которых происходило в автометасоматическую и постмагматическую стадии. Главными концентраторами U, Th, REE, Nb, Ta, Zr, Hf являются многочисленные разнообразные оксиды, карбонаты, силикаты и фосфаты сложного состава, в частности, в рисчорритах: (Nb, Zr)-титанит (сфен), (V, Zr, Nb)-рутил (до 5,2 Nb_2O_5), (V, Nb)-ильменит, хибинскит ($K_2ZrSi_2O_7$), нормандит (NaCa(Mn, Fe)(Ti, Nb, Zr)(Si_2O_7)OF), фекличивит, гатчетолит, флюокарциомикролит, REE–Sr–F-апатит, редко – флюорит. В ПЛС распространены: бадделеит, синхизит, монацит, (V, Zr, Nb)-рутил, (V, Nb, Zr)-сфен, Nb-ильменит, пирохлор, минералы группы эвдиалита (?), колумбит редко (REE, Sr, F)-апатит. В карбонатизированных ПЛС встречены (Ce, La, Nd)-алланит, кальциоанкилит (Ca(Ce, La, Nd)$(CO_3)_2(OH)H_2O$), Sr-перриерит (Ce, Sr, La, Ca)$_4Fe^{2+}$(Ti, Zr, Fe)$_2Ti_2(Si_2O_7)_2O_8$), йортдалит с 0,8 % Th_2O и 0,6 % U_2O – ($Na_4Ca_8Zr_2$(Nb, Mn^{2+})$(Si_2O_7)_4O_3F_5$), паризит, Nb-ильменит, портландит, фабианит (CaB_3O_5OH). Либенеритовые сиениты содержат: цирконолит, (V, Zr, Nb)-рутил, (V, Nb, Zr)-сфен, циркон, паризит, чевкинит, нормандит, (Sr, F)-апатит. Во всех породах встречается магнетит и барит.

Методами SEM и SIMS были определены примеси в сфенах из рисчорритов, ПЛС, КПЛС и ЛС, а также их U-Pb-возраст (Рис. 4 а, б). Определенно, устанавливается обеднение цирконов либенеритовых сиенитов U, Th, Nb, REE и обогащение – Na_2O и SrO. Наиболее высокие содержания и максимальная дисперсия Au (160 ppb Au) и Ag (41 ppb Ag) установлены в Р и ПЛС (среднее – 42,5–44,0 ppb Au; 28–38 ppb Ag) (табл. 1). Состав самородного золота, выделенного из рисчорритов, соответствует $Au_{0,91}Ag_{0,09}$ – $Au_{0,78}Ag_{0,22}$.

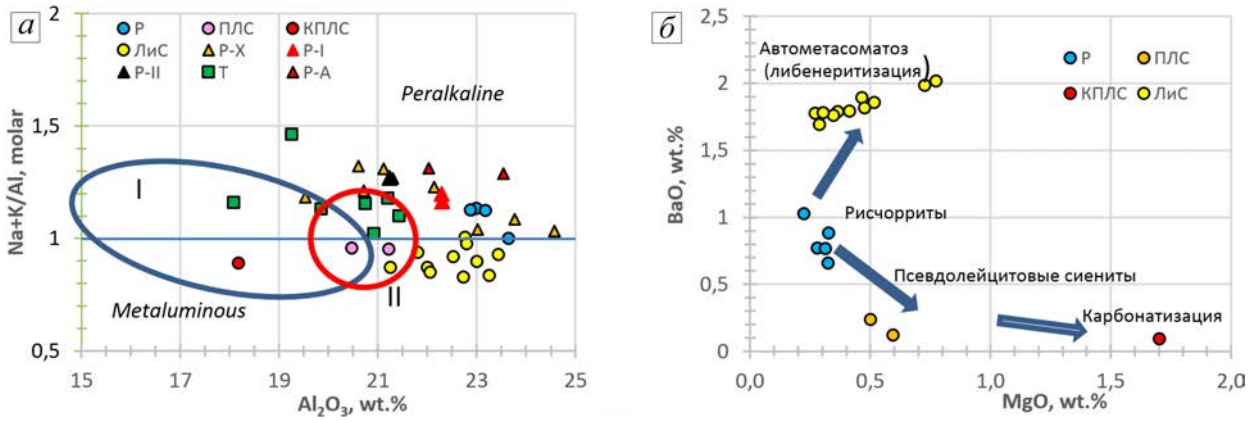


Рис. 2. Диаграммы Al_2O_3 – Na + K/Al и MgO–BaO, отражающие составы пород Богдинского (круги), Томторского (квадраты) и Хибинского (треугольники) щелочных массивов и изменения состава рисчорритов в процессах либенеритизации, образования плевдолейцитовых и карбонатизированных нефелиновых сиенитов.

Богдинский массив – Р – рисчорриты; ПЛС – псевдолейцитовые сиениты; КПЛС – карбонатизированные псевдолейцитовые сиениты; ЛиС – либенеритовые сиениты; поле – I соответствует составам Only F-rich Zr–Ti silicate-bearing породам, а поле II – Mixed assemblages [6]; Хибинский массив – Р–Х – рисчорриты [4, 7]; Р–I – Рисчоррит (средние значения из 14 анализов); Р–II – рисчорриты неполнокольцевой интрузии (среднее) [7]; Р–А – кальсилитовые нефелиновые сиениты [8]; Томторский массив – Т – рисчорриты и рисчорритоподобные породы [9, 10].

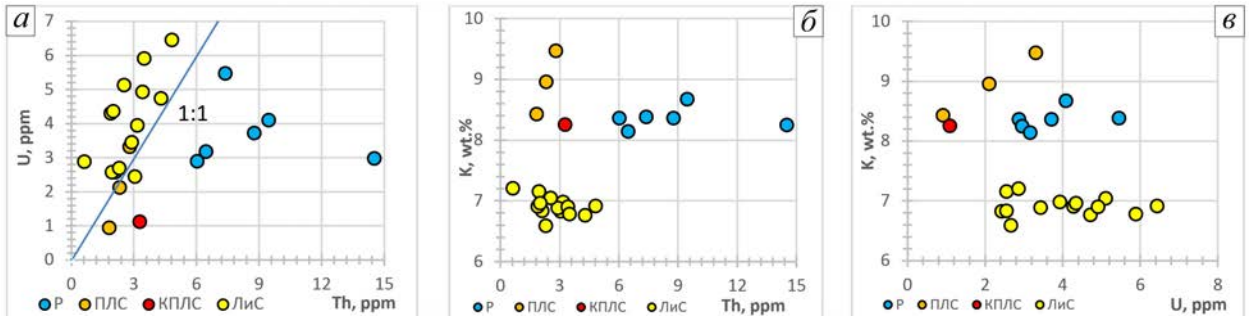


Рис. 3. Th–U, Th–K и U–K диаграммы, характеризующие распределение радиоактивных элементов в щелочных породах массива Богдо

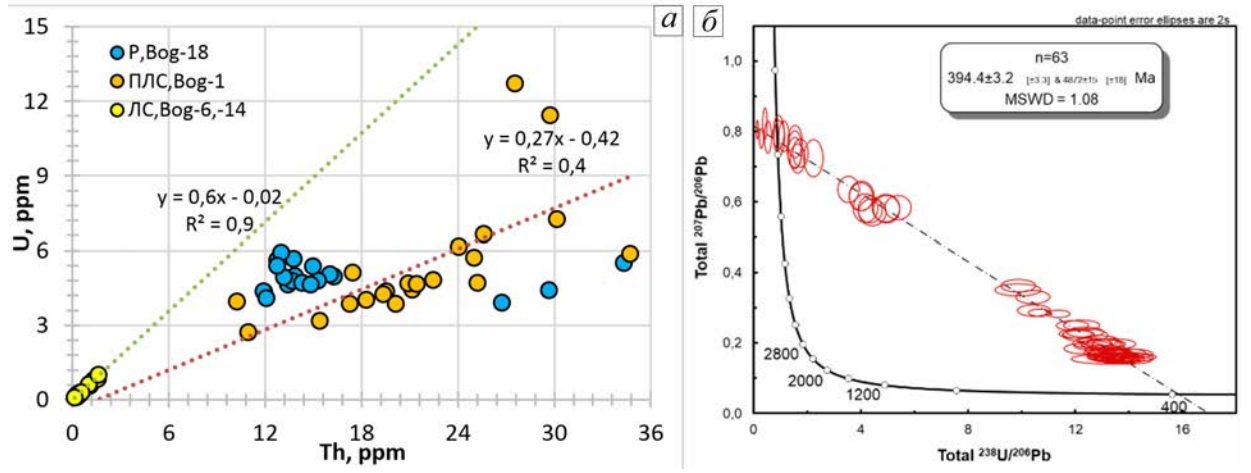


Рис. 4. Th–U диаграмма (А), характеризующая распределение урана и тория в сфенах (титанитах) из щелочных пород массива Богдо; Б – результаты U–Pb датирования сфенов из четырех проб щелочных пород массива Богдо, методом SHRIMP-II

Заключение

Структурные (пойкилитовая структура, симплектиты), петрохимические и минералого-геохимические особенности пород массива Богдо соответствуют рисчорритам, ЛС и ПЛС и свидетельствует в пользу представлений о формировании пород на магматической стадии. Карбонатизация щелочных пород, со значительным возрастанием содержаний титана (2,88 мас. % TiO_2), REE, Nb, Ta с мультиэлементным спектром, близким к томторским карбонатитам, позволяют сделать предположение о возможном значительном распространении карбонатитов с редкометалльной и REE минерализацией в массиве Богдо.

Полученные данные свидетельствуют о среднедевонском времени формирования щелочных магматических пород массива Богдо – 394,4 ± 3,2 Ma [11]. Выделенный возрастной рубеж в полной мере согласуются с эпохой крупнейших проявлений внутриплитного магматизма Сибирского кратона. На основании U–Pb и Ar–Ar датирования пород массива Томтор сделан вывод о двух этапах его формирования в интервалах 701–675 и 414–387 млн лет. Девонский период формирования массива Томтор связывается с воздействием Вилюйского плюма на восточный край Сибирского кратона, что привело к разрывам литосферы и образованию Вилюйской LIP с радиальной системой рифтов, разломов, дайковых поясов [12]. Подобную полихронность формирования можно ожидать и для массива Богдо. В тоже время, известно, что возраст Кольской щелочной провинции (КЩП) соответствует 410–362 Ma [13]. Одной из причин близкого возраста Уджинской и Кольской щелочных провинций может быть влияние периферических зон (в максимальной мере контролирующих положение LIP и кимберлитов) Africa Large Low Shear Velocity Province (“Tuzo”) в девонскую эпоху на Балтику и Сибирь [14]. Петрологические, минералогические, геохимические особенности щелочных пород массива Богдо хорошо сопоставляются с рисчорритами Хибинского массива КЩП и рисчорритоподобными породами Томтора. Самородное золото в щелочных породах массива Богдо имеет морфологию и состав, соответствующий россыпному золоту «уджинского» типа.

Работа поддержана РФФИ грант 18-05-70109 и Госзаданием ИГМ СО РАН. Аналитические исследования выполнены в ЦКП ИГМ СО РАН.

Литература

1. Зайцев А. И. Геохронология и изотопная геология Якутии / А. И. Зайцев, А. Р. Энтин, Н. И. Ненашев и др. – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992 – 248 с.
2. Толстов А. В., Тян О. А. Геология и рудоносность массива Томтор / А. В. Толстов, О. А. Тян. – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1999 – 164 с.
3. Охлопков В. И. Отчет о геолого-поисковых и геолого-съемочных работах в Анабарском районе / В. И. Охлопков. – Якутск: Геологические Фонды, 1987.
4. Андреева Е. Д. Магматические горные породы. Классификация, номенклатура, петрография / Е. Д. Андреева, В. А. Баскина, О. А. Богатиков и др. – Гл. ред. О. А. Богатиков – Ч. 2. – М.: Наука, 1983. – 767 с.
5. Moller V. Petrogenesis of the Nechalacho Layered Suite, Canada: Magmatic Evolution of a REE–Nb-rich Nepheline Syenite Intrusion / V. Moller, A. T. Williams-Jones // Journal of Petrology, 2016. – V. 57. P. 229–276.
6. Marks M. A. W. A global review on agpaitic rocks / M. A. W. Marks, G. Markl // Earth-Science Reviews, 2017. – V. 173. – P. 229–258.
7. Галахов А. В. Петрология Хибинского щелочного массива / Галахов А. В. – Л.: Наука, 1975. – 256 с.
8. Арзамасцев А. А. Кольская щелочная провинция в палеозое: оценка состава первичных мантийных расплавов и условий магмогенерации / А. А. Арзамасцев, Ф. Беа, В. Н. Глазнев, Л. В. Арзамасцева, П. Монтеро // Российский журнал Наук о Земле, 2001. – Т. 3. – № 2. – С. 1–38.
9. Эрлих Э. Н. Новая провинция щелочных пород на севере Сибирской платформы / Э. Н. Эрлих // ЗВМО, 1964. – Ч. XCIII. – Вып. 6. – С. 682–693.
10. Кравченко С. М. Нефелиновые и нефелинсодержащие сиениты массива Томтор, север Сибирской платформы / С. М. Кравченко, М. И. Лапина, И. П. Лапутина, А. П. Хомяков, В. А. Иванов // Петрология, 1994. – Т. 2. – № 2. – С. 224–240.
11. Dobretsov N. L. U–Pb Age of Sphene and the Petrochemical, Mineralogical, and Geochemical Features of Alkaline Rocks of the Bogdo Complex (Arctic Siberia) / N. L. Dobretsov, S. M. Zhmodik, E. V. Lazareva, A. V. Tolstov et al. // Doklady Earth Sciences, 2019. – V. 489 (1). – P. 1352–1357.
12. Vladykin N. V. Age Boundaries of Formation of the Tomtor Alkaline–Ultramafic Pluton: U–Pb and $^{40}Ar/^{39}Ar$ Geochronological Studies / N. V. Vladykin, A. B. Kotov, A. S. Borisenko et al. // Doklady Earth Sciences, 2014. – V. 454. – P. 7–11.
13. Kramm U. Timing of Kola ultrabasic, alkaline and phoscorite-carbonatite magmatism / U. Kramm, S. Sindern // Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the key example of the Kola Alkaline Province. – MSS, 2004. – V. 10. – P. 75–97.
14. Torsvik T. H. Diamonds sampled by plumes from the core-mantle boundary / T. H. Torsvik, K. Burke, B. Steinberger, S. J. Webb, L. D. Ashwal // Nature, 2010. – V. 466 – P. 352–355.

ОЦЕНКА ДОЛГОВРЕМЕННОЙ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, НА ПРИМЕРЕ ПУНКТА ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ФИЛИАЛА «СЕВЕРСКИЙ» ФГУП «НО РАО»

Т. Ю. Заведий[1], О. Н. Кокорев[2]

[1]АО «Сибирский химический комбинат»
Северск, Томская обл., AnAZubkov@rosatom.ru
[2]Северский филиал ФГУП «НО РАО»
Северск, Томская обл., kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

EVALUATION OF LONG-TERM RADIOECOLOGICAL HAZARD FOR RADIONUCLIDES IN LIQUID RADIOACTIVE WASTES ON EXAMPLE OF THE DEEP DISPOSAL SITE IN SEVERSK

T. Yu. Zavedy[1], O. N. Kokorev[2]

[1]JSC “Siberian Chemical Combine”
Seversk, Tomsk region, AnAZubkov@rosatom.ru
[2]Seversk branch of FSUE “NO RWM”
Seversk, Tomsk region., kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

The paper presents the calculation of different type radionuclides volume activity values in LRW. The authors also estimate long-term radiological and ecological hazard accordingly to the minimum possible time criterion of complete discharge for groundwater containing non-sorbed neutral component.

Введение

В составе комплекса мероприятий, связанных с обоснованием безопасности эксплуатации пунктов глубинного захоронения (ПГЗ) жидких радиоактивных отходов (ЖРО), наиболее важной считается задача выполнения долговременных прогнозных расчетов миграции в подземных водах (ПВ) для значительного числа радионуклидов. Применительно к специфике глубинного захоронения ЖРО интерес представляют, прежде всего, радионуклиды с большим выходом при делении ядер или захвате нейтронов и с достаточно длительным периодом полураспада. Определение границ исчерпывающего списка радионуклидов, опасных с радиоэкологической точки зрения, необходимо для оптимизации ведения мониторинга и выполнения долговременных прогнозных расчетов миграции радиоактивных компонентов ЖРО. Цель данной работы – определить наиболее полный список и выполнить оценку потенциальной радиоэкологической опасности для радионуклидов, входящих в состав ЖРО и способных мигрировать с подземными водами в течение длительных промежутков времени ($n \cdot 10^3$ лет). Дальнейшие оценки будут выполнены применительно к технологии глубинного захоронения и гидрогеологическим условиям объекта исследования – ПГЗ ЖРО «Северский» ФГУП «НО РАО» (далее – ПГЗ ЖРО), г. Северск, Томская область.

Гидрогеологическое строение объекта исследования

Объект исследования – ПГЗ ЖРО «Северский» ФГУП «НО РАО» – находится в 25 км к северу от г. Томск. Геологическое строение разреза района ПГЗ ЖРО представлено осадочным чехлом мезозойско-кайнозойских отложений, фундаментом для которых служат сланцевые породы палеозойского возраста. В гидрогеологическом строении ПГЗ ЖРО выделяют 7 водоупоров (A, B, C, D, E, F, G) и шесть горизонтов (I, II, III, IV, V, VI). Направление регионального потока фильтрации в горизонтах – на ЮЗ, место разгрузки потока – р. Томь. Глубинное захоронение технологических среднеактивных отходов (САО) осуществляется только во II горизонт на участке, расположенном на удалении 8.5 км от р. Томь. Захоронение нетехнологических низкоактивных отходов (НАО) осуществляется во II и III горизонты на участке, удаленном от р. Томь на 13 км. Горизонт IV является буферным. Горизонты V и VI используются для хозяйственно-питьевого и технологического водоснабжения г. Северска на водозаборах № 1 и № 2 (ВЗ-1 и ВЗ-2). Участок захоронения САО (площадка 18а) расположен ближе к р. Томь, чем участок захоронения НАО (площадка 18). Также исходные объемные активности радионуклидов в НАО на порядки ниже, чем в САО, поэтому дальнейший расчет следует выполнять именно для

условий захоронения и контура распространения САО, сформированного за весь период эксплуатации ПГЗ ЖРО.

Расчет времени разгрузки нераспадающегося несорбируемого компонента

Для оценки радиоэкологической опасности радионуклидов, в первую очередь, необходимо определить временны́е ограничения, в течение которых они гарантированно не выйдут за пределы заранее отведенного участка геологической среды (горного отвода недр). Предварительная оценка времени разгрузки компонентов ЖРО с подземными водами в р. Томь производится в рамках консервативного предположения об отсутствии каких-либо механизмов распада (деструкции) и задержки мигрирующих радионуклидов в системе вода-порода. В работах [6, 7, 14] приведены результаты долговременного прогнозного моделирования миграции фильтрата отходов на объекте исследования. В работе [10] приведены результаты применения изотопных методов для исследования возраста ПВ и интенсивности водообмена в районе расположения ПГЗ ЖРО «Северский».

В результате расчета в диапазоне варьирования гидрогеологических параметров горизонтов (пористость песков, коэффициент фильтрации песков) и водоупоров (пористость глин, коэффициент фильтрации глин) было получено логнормальное распределение значений времени разгрузки t_R нейтрального компонента: минимальное значение – 2840 лет, максимальное значение – 11551 год, среднее арифметическое значение – 6078 лет, среднее логарифмическое значение – 5752 года, квантиль 1 % – 2503 лет, квантиль 5 % – 2951 год. Таким образом с вероятностью 99 % можно утверждать, что разгрузка нейтрального несорбируемого нераспадающегося компонента по пути миграции контура САО в р. Томь при отсутствии механизмов задержки произойдет не ранее чем через 2500 лет. Горизонтальная скорость миграции нейтрального компонента в вариантах расчета изменялась в интервале от 0,91 до 5,5 м/год, в среднем составляя 2,68 м/год.

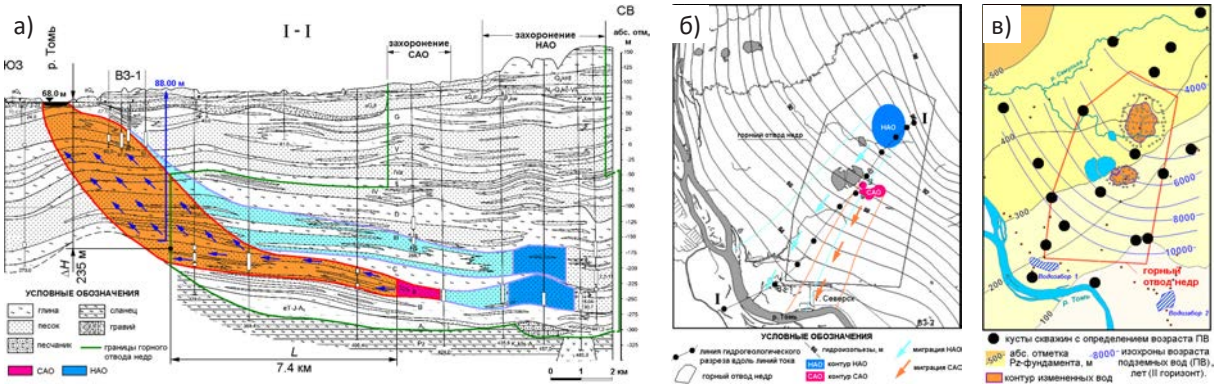


Рис. 1. Условия миграции ЖРО: а) гидрогеологический разрез и проекция шлейфа миграции компонентов ЖРО; б) план гидроизопьез II горизонта и полос миграции ЖРО в районе ПГЗ ЖРО к месту разгрузки – р. Томь; в) изохроны возраста подземных вод II горизонта по материалам [Токарев и др., 2009]

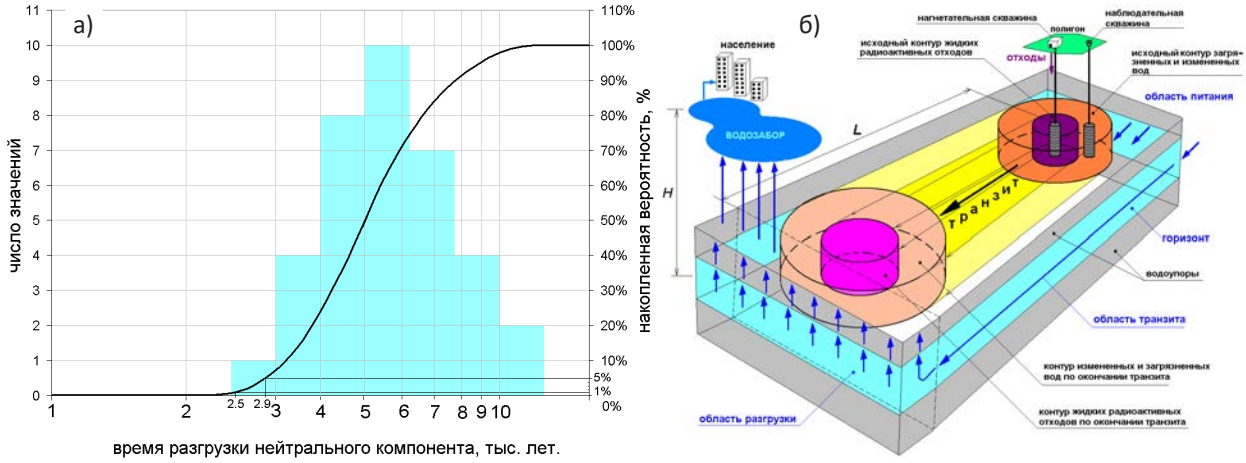


Рис. 2. Оценка времени разгрузки нейтрального компонента и упрощенная схематизация процесса долговременной миграции компонентов ЖРО: а) гистограмма значений времени разгрузки несорбируемого нейтрального компонента; б) упрощенная схема долговременной миграции и разгрузки загрязнения от ПГЗ ЖРО

Типы радионуклидов, являющихся компонентами ЖРО

Из большого числа радионуклидов, образующихся при делении атомных ядер, можно выделить три разных типа, сильно отличающихся по своему способу появления в облученном урановом топливе, а затем и в составе ЖРО. Всего можно выделить три группы: **активационные** нуклиды, **осколочные** нуклиды и **актиноиды**.

Активационные нуклиды. Являются продуктами активации стабильных ядер, входящих в состав топлива или конструкционных материалов реактора, при воздействии на них тепловых нейтронов. Для долговременных расчетов миграции компонентов ЖРО в геологической среде группу активационных нуклидов представляют только ^{36}Cl и ^{60}Co.

Осколочные нуклиды – самая большая группа нуклидов, насчитывающая около сотни ядер с разными периодами полураспада. Они являются либо непосредственно осколками деления ядер урана и плутония, либо продуктами активации других осколочных ядер. Здесь можно выделить несколько подгрупп, заметно отличающихся по способу своего образования в реакторе: основные осколочные нуклиды, **осколочно-активационные** нуклиды, **продукты тройного деления** и **нуклиды мгновенного деления**.

Детальнее:

- **основные осколочные нуклиды** (^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{106}Ru, ^{95}Zr, ^{144}Ce, ^{147}Pm, ^{99}Tc…) – обычно представляют собой последний радиоактивный изотоп с наибольшим периодом полураспада в составе своей цепочки β-распадов с массовым числом $A = const$;
- **осколочно-активационные нуклиды** (^{134}Cs, ^{152}Eu, ^{154}Eu…) – являются продуктами активации радиоактивных или стабильных осколочных ядер с большими сечениями захвата тепловых нейтронов в период их нахождения в реакторе. Особенностью осколочно-активационных нуклидов является нелинейная (квадратичная) динамика накопления и концентрация в облученном топливе, на порядки меньшая, чем у основных осколков с такими же значениями A;
- **продукты тройного деления** – в редких случаях ядро урана или плутония делится на два тяжелых осколка и один лёгкий. Здесь наибольший интерес для долговременных расчетов миграции представляют: ^{3}H, ^{10}Be, ^{14}C;
- **нуклиды мгновенного деления** (^{88}Y, ^{102}Rh, ^{136}Cs…) – а отличие от основных осколочных нуклидов, которые появляются в результате последовательного накопления по всей цепочке β-распадов с одинаковым массовым числом A, до нуклидов мгновенного деления цепочка распадов уже не доходит, поэтому у большинства из них выход на порядки ниже, чем у основных осколочных нуклидов с таким же значением A.

Актиноиды – нуклиды с наибольшими значениями A, представляют собой изотопы U, Np, Pu, Am, Cm. Они образуются в реакторе в результате нескольких последовательных цепочек захвата тепловых нейтронов; стартовыми изотопами для них являются ^{234}U, ^{235}U, ^{236}U и ^{238}U.

Образование радионуклидов и их максимальная концентрация в ЖРО

Основой для оценки накопления радионуклидов являются данные о режимах работы промышленных реакторов [13, 15], информация по ядерным константам, постоянным распада, сечениям захвата нейтронов и деления [11, 12], а также описания основных схем этапов радиохимической переработки ОЯТ [2, 4, 5].

Оценка образования i-го основного осколочного радионуклида с массовым числом A на 1 тонну урана (тU) выполнена по простой зависимости:

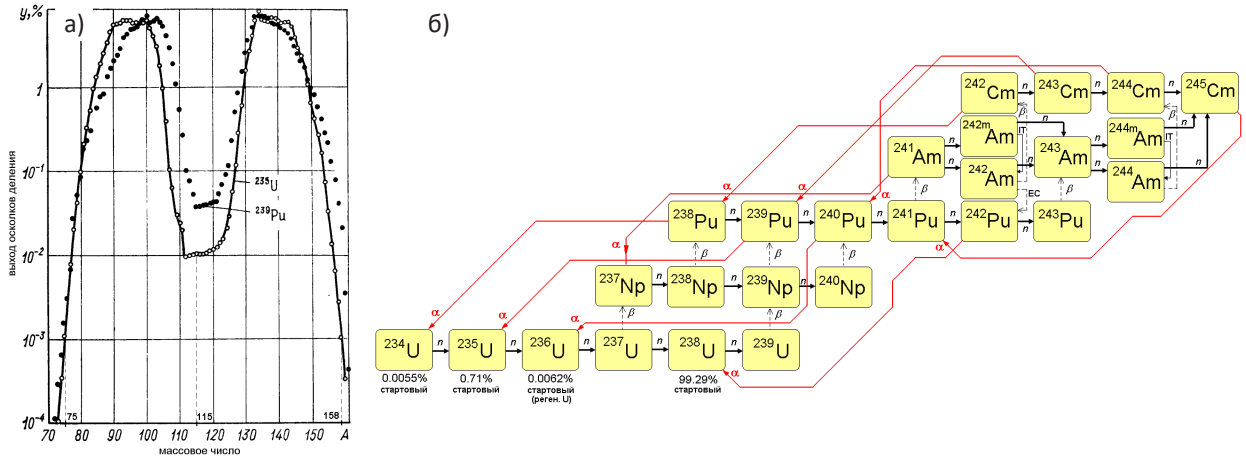


Рис. 3. Расчет образования радионуклидов: а) кривая выхода осколков деления (для основных осколочных радионуклидов) при делении U, Pu; б) упрощенная схема накопления актиноидов в реакторе на основании [3]

$$N_i(A) = y(A) \bullet N_f, \quad (1)$$

где N_f – количество ядер ^{235}U, подвергшихся делению на 1 тU; A – массовое число ядра-осколка; $y(A)$ – накопленный выход i-го основного осколка деления с массовым числом A.

Простые расчеты накопления актиноидов на тонну облученного топлива были выполнены по зависимостям из [1]. Ядерные константы: сечения захвата нейтронов и деления, – взяты из [11, 12].

В результате выполнены оценки образующейся активности суммарно для **147** радионуклидов, из них: **3** – продукты тройного деления, **2** – активационные, **106** – основные осколочные (A = 65 ÷ 170), **12** – осколки мгновенного деления, **8** – осколочно-активационные и **16** – актиноиды (A = 235 ÷ 244).

Максимально возможная концентрация i-го нуклида C^i_{max} в Бк/л в жидкой фазе отходов (и соответственно затем – в ПВ) оценивалась по зависимости:

$$C^i_{max} = k^i_{LRW} \frac{A^i_U}{V_{LRW}} \bullet 10^{-3}, \quad (2)$$

где A^i_U – удельная активность i-го радионуклида в облученном урановом топливе, Бк/тU; k^i_{LRW} – коэффициент перехода i-го радионуклида в ЖРО при радиохимической переработке; V_{LRW} – объем образования технологических ЖРО с одной тонны облученного уранового топлива, м^3/тU.

Для упрощения оценок обоснованно предполагается, что на этапе радиохимической переработки изотопы минорных актинидов (Np, Am, Cm) попадали в ЖРО полностью k_{LRW} = 1, а U, Pu – в результате потерь, k_{LRW} << 1, доля которых для экстракционной технологии задавалась из [9]. Суммарное время всех технологических операций от выгрузки из реактора до попадания радионуклида в геологическую среду было условно принято равным 1 году. Через этот промежуток времени в составе технологических ЖРО уже только 42 нуклида из 147 (28,5 %) по уровню своей объемной активности превышали нормативные уровни вмешательства [8] в воде (УВ).

Время t_D, в течение которого i-ый нуклид в фильтрате ЖРО представляет собой радиоэкологическую опасность, критерием которой является превышение нормативного значения УВ, рассчитывается по формуле:

$$t^i_D = \frac{1}{\lambda^i} \ln \frac{C^i_{max}}{C^i_{YB}}, \quad (3)$$

где C^i_{YB} – нормативный УВ (вода) i-го радионуклида [8], Бк/л; λ^i – постоянная распада i-го нуклида, 1/год.

В результате расчета по (3) радионуклиды можно разбить на три класса:

Класс I – неопасные нуклиды, время снижения активности которых до уровней ниже УВ в геологической среде происходит за время, соизмеримое с самим сроком эксплуатации ПГЗ ЖРО (~ 50 лет).

Класс II – радионуклиды промежуточной категории опасности, время снижения активности которых до уровней ниже УВ в геологической среде происходит за время более 50 лет, однако оно менее принятого минимально возможного времени разгрузки 2500 лет несорбируемого нераспадающегося нейтрального компонента.

Класс III – потенциально опасные радионуклиды, время снижения активности которых до уровней ниже УВ в геологической среде происходит за период, превышающий принятое минимально возможное время разгрузки 2500 лет для несорбируемого нераспадающегося нейтрального компонента.

В результате классификации (табл. 1) для долговременных расчетов (более 2500 лет) обоснования безопасности ПГЗ ЖРО «Северский» в постэксплуатационный период достаточно учитывать только **16** радионуклидов из **147** (10,9 %). Потенциально опас-

Таблица 1. Классификация нуклидов по радиоэкологической опасности для условий ПГЗ ЖРО «Северский»

Группа нуклидов	Класс I (t_D < 50 лет)	Класс II (50 < t_D < 2500 лет)	Класс III (t_D > 2500 лет)	
Активационные**	^{60}Co	---	---	1
Основные осколочные	^{89}Sr, ^{91}Y, ^{95}Zr, ^{103}Ru, ^{106}Ru, ^{123}Sn, ^{144}Ce,	^{90}Sr, ^{125}Sb, ^{137}Cs ^{147}Pm, ^{151}Sm, ^{155}Eu	^{79}Se, ^{93}Zr, ^{99}Tc, ^{107}Pd, ^{126}Sn, ^{129}I*, ^{135}Cs	20
Осколочно-активационные	^{148m}Pm, ^{160}Tb	^{134}Cs, ^{152}Eu, ^{154}Eu	---	5
Продукты тройного деления	---	^{3}H*	^{14}C	2
Мгновенного деления	---	---	---	0
Актиноиды	^{242}Cm	^{238}Pu, ^{241}Pu, ^{242m}Am, ^{243}Cm, ^{244}Cm	^{235}U, ^{236}U, ^{238}U, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{237}Np, ^{241}Am, ^{243}Am	14
Итого:	11	15	16	**42**

* – в предположении, что при переработке в ЖРО переходит только 10 % радионуклида; ** – для ^{36}Cl зарегистрированная объемная активность в ПВ на ПГЗ ЖРО менее УВ.

ными из этих радионуклидов являются те, по отношению к которым сорбционные свойства вмещающих пород горизонтов и водоупоров могут оказаться крайне низкими. По опыту многолетнего мониторинга на ПГЗ ЖРО «Северский» в настоящий момент можно уверенно утверждать, что из радионуклидов, мигрирующих в катионной форме, для ^{135}Cs сорбционные свойства пород являются наиболее высокими, для актиноидов – средними, а для ^{99}Tc – низкими. Однако наименьших задерживающих свойств осадочных пород следует ожидать по отношению к долгоживущим радионуклидам ^{14}C, ^{79}Se и ^{129}I, в значительной мере способных мигрировать в ПВ в анионной форме.

В настоящее время необходимо продолжать изучение миграционных свойств в ПВ для всех радионуклидов, которые будут представлять собой наибольшую радиоэкологическую опасность (класс III, табл. 1) в течение длительных промежутков времени после прекращения эксплуатации ПГЗ ЖРО «Северский».

Литература

1. Андрюшин И. А., Юдин Ю. А. Риски распространения и проблема энергетического плутония. – Саров, Саранск: Типография «Красный Октябрь», 2007. – 124 с.
2. Гаврилов П. М., Меркулов И. А., Мацеля В. И., Друзь Д. В., Опыт и проблемы переработки ЖРО сложного химического состава ФГУП «ГХК» // Радиоактивные отходы, 2019. – № 1 (6). – С. 62–68.
3. Герасимов А. С., Зарицкая Т. С., Рудик А. П. Справочник по образованию нуклидов в ядерных реакторах. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 575 с.
4. Землянухин В. И., Ильенко Е. И., Кондратьев А. Н., Лазарев Л. Н., Царенко А. Ф., Царицина Л. Г. Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС. – М: Энергоатомиздат, 1983. – 232 с.
5. Зильберман Б. Я. Развитие Пурекс-процесса для переработки высоковыгоревшего топлива АЭС в замкнутом ЯТЦ с точки зрения локализации долгоживущих радионуклидов. Современные проблемы химии и технологии экстракции. Сборник статей. Т. 1. – Москва, 1999. – С. 271–289.
6. Зубков А. А., Данилов В. В., Истомин А. Д., Носков М. Д. Прогнозное моделирование распространения фильтрата жидких радиоактивных отходов в пластах-коллекторах полигона глубинного захоронения Сибирского химического комбината. // Вестник ТГУ, 2008, – № 1 (306). – С. 161–167.
7. Зубков А. А., Рыбальченко А. И., Румынин В. Г., Токарев И. В., Данилов В. В., Сухоруков В. А., Захарова Е. В., Александрова Л. Н. Анализ системы геотехнологического мониторинга полигона подземного захоронения жидких радиоактивных отходов Сибирского химического комбината. Разведка и охрана недр, 2007. – № 11. – С. 56–62.
8. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.
9. Розен А. М. Экстракция в атомной промышленности. Элементы экстракционной технологии отработавшего ядерного топлива АЭС. Современные проблемы химии и технологии экстракции. Сборник статей. Т. 1. – Москва, 1999. – С. 246–264.
10. Токарев И. В., Зубков А. А., Румынин В. Г., Поздняков С. П. Оценка долгосрочной безопасности захоронения радиоактивных отходов. 2. Исследование водообмена в многослойной системе изотопными методами. // Водные ресурсы, 2009. – Т. 36. – № 3. – С. 363–374.
11. Электронный ресурс. WWW Chart of the Nuclides 2014, 1995-2020, Japan Atomic Energy Agency, Nuclear Data Center. Режим доступа (06.06.2021): https://wwwndc.jaea.go.jp/CN14/index.html.
12. Электронный ресурс. Table of Nuclides, Nuclear Data Center at KAERI. Режим доступа (06.06.2021): http://atom.kaeri.re.kr/nuchart/.
13. Anatoli Diakov. The History of Plutonium Production in Russia, Science and Global Security, 2011. – Vol. 19. – P. 28-45.
14. Shestakov V. M., Kuvaev A. A., Lekhov A. V. et al. Flow and transport modeling of liquid radioactive waste injection using data from the Siberian Chemical Plant Injection Site. // Environmental Geology, 2002. – V. 42. – № 2–3. – P. 214–221.
15. Thomas B. Cochran, Robert S. Norris, Oleg A. Bukharin Making the Russian Bomb from Stalin to Yeltsin. – San-Francisco, Oxford, Natural Resources Defense Council, 1995.

УРАН И ТОРИЙ В ВОДАХ ГОРНОРУДНЫХ ОБЪЕКТОВ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ДАРАСУНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Л. В. Замана, Л. В. Таскина, Ш. А. Аскаров

Институт природных ресурсов. экологии и криологии СО РАН
Чита, Россия. l.v.zamana@mail.ru, mila.taskina@mail.ru

URANIUM AND THORIUM IN THE DEVELOPMENT OBJECTS WATERS OF THE GOLD-ORE DEPOSITS OF THE DARASUN ORE FIELD (EASTERN TRANSBAIKALIA)

L. V. Zamana, L. V. Taskina, Sh. A. Askarov

Institute of Natural Resources, Ecology and CryologySB RAS
Chita, Russia, l.v.zamana@mail.ru, mila.taskina@mail.ru

According to the ICP-MS analysis, the U and Th concentrations in the waters of the mining objects of the Darasun ore field vary in the intervals of 0.44–23.1 and 0.0001–0.105 μg/L, respectively. The highest U content in the water of the open pit lake of the Talatui deposit is considered as a sign of its increased content in ores or host rocks. There is no correlation between the U and Th concentrations in water samples. According to the results of calculations using the MINTEQ program, the only aqueous form of thorium is its complex with a carbonate ion; various carbonate complexes (from one to three CO_3^{2-}) are also the main ones in the water migration of uranium.

Введение

Изучение распределения урана и тория в водах горнорудных объектов Балейского и Тасеевского золоторудных месторождений, также находящихся в Восточном Забайкалье, показало, что при низком естественном радиохимическом фоне территории могут возникать техногенные гидрогеохимические системы с аномально высокими концентрациями этих элементов – до 37,6 и 93,0 мкг/л Th и U соответственно [3]. Для сравнения, в воде оз. Байкал среднее содержание их 0,004 и 0,55 мкг/л [2]. В настоящем сообщении представлен анализ данных по содержанию тория и урана в водах зоны влияния горнорудных разработок месторождений золота Дарасунского рудного поля по результатам гидрогеохимического опробования, выполненного с целью изучения водной миграции рудных и попутных элементов в различных геотехногенных системах рудных месторождений.

Объекты и методы

Дарасунское рудное поле локализовано в пределах золото-молибденового рудного пояса, одного из трех, выделенных С. С. Смирновым (1936) на территории Забайкалья. В него входят Дарасунское и Талатуйское золоторудные, Теремкинское золото-серебряное и Усть-Теремкинское серебряное месторождения и ряд рудопроявлений [13]. Эксплуатация Теремкинского месторождения приостановлена несколько лет назад, Дарасунское и Талатуйское месторождения разрабатываются, первое – подземным способом, второе – карьером, но при гидрогеохимическом опробовании (лето 2019 г.), результаты которого здесь рассмотрены, они находились на консервации. Характеристика геологического строения и минералого-геохимических особенностей месторождений содержится в работах [10–13 и др.].

Руды Талатуйского месторождения локализованы в магматических породах основного и среднего состава (габбро, габбро-диориты, диориты) палеозойского возраста, окруженными более молодыми разновозрастными гранитоидами. Основными рудными минералами являются пирит, халькопирит и марказит, жильными – турмалин. Карбонаты в составе жильных минералов не представлены [10, 12]. Золотоносные жилы Теремкинского месторождения приурочены к контактам основных (метагаббро) и щелочно-кислых (граносиениты) пород. Для рудных жил Дарасунского месторождения типично залегание в породах гранодиоритового комплекса и в зоне контакта гранитоидов и габбро-амфиболитов [13]. Основными рудными минералами являются пирит, халькопирит, арсенопирит, сфалерит и галенит, жильными – кварц, турмалин и карбонаты [11, 12].

Схема гидрогеохимического опробования представлена на рисунке. По Тасеевскому месторождению проба ТЛ-19-5 отобрана из карьерного озера, остальные, как и по Теремкинскому месторождению, из подотвальных выходов. В зоне влияния Дарасунского месторождения проба ВД-19-1 взята из шахтного водоотлива, ВД-19-2 – на сливе из действующего хвостохранилища (ХВ), ВД-19-5 – из старого ХВ, ВД-19-6 – из выхода под его дамбой, остальные отобраны из руч. Дарасун, собирающего сток с объ-

Рис. 1. Схема расположения пунктов гидрогеохимического опробования в зонах влияния горнорудных разработок месторождений Дарасунского рудного поля. Индексы точек: ТЛ – Талатуйское, ТР – Теремкинское, ВД – Дарасунское месторождения

ектов рудника и дренирующего нарушенную разработкой золотоносных россыпей его долину. Точка ВД-19-8 на рисунке не указана, находится в 11,2 км ниже ВД-19-7.

Анализ водных проб на макро- и некоторые микрокомпоненты выполнен в аттестованной лаборатории ИПРЭК СО РАН по общепринятым нормативным методикам. Уран и торий определены методом ICP-MS в Аналитическом центре Института геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) на приборе ELEMENT 2, фирмы Finnigan MAT по методике НСАМ № 480Х с использованием в качестве стандартов сертифицированных растворов. Анализировались пробы, подкисленные особо чистой концентрированной азотной кислотой до pH < 2, пропущенные через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм. Расчёт форм миграции и термодинамических равновесий с возможными минеральными новообразованиями выполнен по программе MINTEQ [14], версия 3. Для выявления корреляционных связей использована программа Statistica.

Результаты и обсуждение

Основные физико-химические характеристики вод в опробованных пунктах приведены в табл. 1. Сульфидный состав руд определил преобладание по всем водным пробам по анионам сульфата при преимущественно магниево-кальциевом составе катионов. Для подотвальных вод Талатуйского месторождения характерен аномальный уровень нитратов, отмеченный и по данным опробования 2014 г. [5] и вызванный наличием в отвалах остатков взрывчатых веществ. Подобное выявлено и по другим месторождениям Забайкалья [6].

Наиболее минерализована вода старого хвостохранилища, немногим меньше она в одной из проб дренажа отвалов Талатуйского карьера. Близкие химические показатели проб ВД-19-1 и ВД-19-2 объясняются сбросом в действующее хвостохранилище шахтного водоотлива при отсутствии поступления промстоков не работавшей в тот период обогатительной фабрики.

Концентрации урана и тория (табл. 1) укладываются в три математических порядка, но распределение их по пробам различно, корреляция отсутствует, тогда как между концентрацией Th и Th/U корреляция положительная с коэффициентом 0,72. Максимальная концентрация U установлена в воде Талатуйского карьера (23,1 мкг/л). Уран относится к накапливающимся элементам, с повышением минерализации содержание его, как правило, растёт. По данной выборке этого не наблюдается, корреляция между U и суммой ионов воды при отрицательной величине (–0,26) незначима. Для пресных вод концентрация урана 10^{-5} г/л является аномальной и указывает на наличие урановой минерализации или повышенный уровень его в горных породах. Именно как признак обогащенности ураном руд или вмещающих их пород мы рассматриваем данные по урану в воде карьера. Сведения по содержанию радиоактивных элементов в геохимических полях месторождений Дарасунского рудного поля в [12] и других пу-

Таблица 1. Физико-химические показатели водных проб Дарасунского рудного поля (CO_2–P – мг/л, As–U – мкг/л)

Показатель	Пробы воды														
	ТЛ-19-1	ТЛ-19-2	ТЛ-19-3	ТЛ-19-4	ТЛ-19-5	ТР-19-1	ТР-19-2	ВД-19-1	ВД-19-2	ВД-19-3	ВД-19-4	ВД-19-5	ВД-19-6	ВД-19-7	ВД-19-8
pH	6,9	6,8	6,3	7,1	7,7	7,5	7,4	6,2	6,3	7,5	7,3	7,8	7,1	7,7	7,4
Eh, мВ	258	262	278	214	220	303	291	190	225	232	138	223	-22	89	154
ПО, мгО/л	15,8	7,48	13,4	4,08	3,25	3,99	4,08	5,23	1,27	1,10	2,69	2,27	72,5	5,96	10,4
CO_2	10,8	9,46	19,4	11,2	2,64	5,72	9,46	7,04	7,70	4,84	11,0	4,18	29,7	5,50	6,60
HCO_3^-	68,9	38,4	29,9	78,7	78,4	73,1	123	6,41	8,24	25,0	115,3	70,2	292	115,3	105
SO_4^{2-}	196	346	470	940	218	188	564	1150	1167	1074	856	1598	539	514	136
Cl^-	2,56	1,54	21,5	4,71	0,87	1,02	0,56	17,9	17,9	18,4	14,2	20,3	56,0	12,5	4,10
F^-	0,11	0,19	0,10	0,43	0,20	0,26	0,48	0,46	0,42	0,33	0,33	0,52	0,50	0,33	0,30
NO_3^-	118	42,9	1028	135,6	2,15	6,96	1,05	2,15	2,47	2,30	1,21	1,49	23,5	2,30	2,83
NO_2^-	0,42	0,96	2,56	0,179	0,042	0,017	0,008	0,019	0,28	0,037	0,056	0,179	0,063	0,112	0,26
Ca^{2+}	93,9	121,8	362	278	62,6	60,9	207	303	362	339	296	470	158	182	52,6
Mg^{2+}	20,4	26,4	98,7	126,2	11,4	8,09	29,6	65,6	68,5	52,7	53,5	97,4	25,0	36,7	17,4
Na^+	11,6	5,86	26,9	18,8	5,77	1,46	5,65	29,9	29,6	26,3	19,2	69,0	178	17,5	11,2
K^+	4,63	7,1	16,2	10,1	3,74	2,06	2,93	3,82	3,76	4,31	6,04	30,2	5,67	4,12	2,40
NH_4^+	0,61	0,20	9,58	0,38	0,24	1,43	0,67	1,18	0,35	0,40	1,14	6,70	7,57	0,1	0,05
Σ ионов	517	591	2066	1593	384	343	935	1587	1660	1543	1363	2364	1285	885	332
Si	4,22	3,92	2,83	2,24	3,64	2,78	4,64	6,56	6,82	7,08	5,12	2,94	5,10	5,19	5,20
P	0,085	0,087	0,14	0,075	0,11	0,087	0,07	0,05	0,07	0,06	0,055	0,065	0,26	0,075	0,08
As	0,57	0,47	1,61	0,31	0,57	5,30	1,66	4,86	5,27	6,63	6,37	0,44	21,2	21,6	92,4
Th	0,0244	0,0053	0,0022	0,0072	0,0094	0,0118	0,0019	0,0030	0,0029	0,0036	0,0044	0,0141	0,0100	0,0081	0,1053
U	0,50	1,16	0,43	12,8	23,1	3,48	19,59	0,44	0,64	3,26	3,21	1,45	6,15	2,35	2,63
Th/U	0,0488	0,00457	0,00512	0,00056	0,00041	0,00339	0,0001	0,00682	0,00453	0,0011	0,00137	0,00972	0,00163	0,00345	0,04004
$*CO_3^{2-}$	26.0	11.5	2.8	46.8	185	109	30.4	0.48	0.78	37.3	109	209	173	279	25

ПО – перманганатная окисляемость; * – расчетное значение, мкг/л.

Таблица 2. Формы нахождения урана в водных пробах (мольный %)

Формы нахождения	Водные пробы														
	ТЛ-19-1	ТЛ-19-2	ТЛ-19-3	ТЛ-19-4	ТЛ-19-5	ТР-19-1	ТР-19-2	ВД-19-1	ВД-19-2	ВД-19-3	ВД-19-4	ВД-19-5	ВД-19-6	ВД-19-7	ВД-19-8
UO_2^{2+}			0,04					1,61							
$UO_2(OH)^+$		0,06	0,29					8,67	0,30						
$UO_2(OH)_3^-$								0,02	0,12						
$UO_2(OH)_2$ (aq)		0,04	0,06					1,45	0,63	0,01					
UO_2F^+			0,01					2,32							
UO_2F_2								0,15							
UO_2SO_4 (aq)			0,05					5,06	0,01						
$UO_2(SO_4)_2^{2-}$								0,43							
UO_2HPO_4 (aq)		0,05	0,45					5,68	0,07						
$UO_2PO_4^-$	0,02	0,16	0,44					4,42	0,68						
$Ca_2UO_2(CO_3)_3$ (aq)	72,83	71,99	78,00	80,45	65,88	66,40	80,56	6,51	78,66	82,77	82,72	84,04	74,35	78,98	63,95
$CaUO_2(CO_3)_3^{2-}$	24,92	22,71	11,45	18,90	33,17	32,42	19,11	1,51	15,51	16,61	16,97	15,71	25,03	20,70	34,73
UO_2CO_3 (aq)	0,53	2,12	6,73	0,06	0,02	0,06		44,39	1,77	0,08			0,01		0,06
$UO_2(CO_3)_2^{2-}$	1,37	2,52	2,17	0,33	0,39	0,63	0,12	2,55	1,50	0,32	0,12	0,05	0,19	0,08	0,67
$UO_2(CO_3)_3^{4-}$	0,29	0,27	0,09	0,26	0,54	0,49	0,20	0,02	0,18	0,19	0,19	0,20	0,42	0,24	0,58
$UO_2H_3SiO_4^+$		0,06	0,22					15,22	0,55						

бликациях отсутствуют. Обратим внимание на рост концентрации U с 1,45 до 6,15 мкг/л (табл. 1, пробы ВД-19-5 и ВД-19-6) при фильтрации через хвосты обогащения, тогда как основные ионы из раствора высаживаются.

Наиболее высокое содержание тория (0,105 мкг/л) установлено в руч. Дарасун (табл. 2, проба ВД-19-8). Мы связываем его с обогащенностью монацитом аллювиальных отложений, что подтверждает высокое содержание в воде церия (4,26 мкг/л). В этой же пробе максимально содержание мышьяка (92,4 мкг/л) и ряда других микроэлементов, в частности, Ti, V, Cr.

По результатам термодинамических расчетов водной формой тория является комплекс $Th(OH)_3CO_3^-$ (табл. 2). В водной миграции урана карбонатные комплексы также основные. В большей части проб они представлены четырьмя компонентами с преобладанием недиссоциированного уранил-трикарбонатного комплекса кальция $Ca_2UO_2(CO_3)_3$ (aq), исключая пробу ВД-19-1, в которой доминирующим является уранил-монокарбонат. Эта же проба единственная, где присутствуют все другие полученные по расчёту комплексы урана. Причина этого, по-видимому, в следующем.

Из всей выборки проба ВД-19-1 имеет наиболее низкое содержание иона HCO_3^- и минимальное значение pH, из-за чего концентрация карбонат-иона CO_3^{2-}, рассчитанная по второй константе диссоциации угольной кислоты ($K_2 = 4{,}8 \bullet 10^{-11}$ по [7]) также наименьшая (0,48 мкг/л). В результате из-за дефицита карбоната уранил образует комплекс преимущественно с одним анионом CO_3^{2-} и вступает в соединения с имеющимися в воде другими лигандами. При этом, несмотря на слабокислую величину pH, немногим более 10 % форм приходится на гидроксиды уранила, тогда как по [9] они могут появляться при высоком значении pH. Отметим также наличие по этой пробе уранил-фторидных комплексов. По разнообразию комплексов урана далее следуют пробы ТЛ-19-3 и ВД-19-2 (табл. 2), также отличающиеся низкими концентрациями ионов гидрокарбоната и карбоната.

Выполненные расчёты термодинамических равновесий показали, что по торию все пробы при отсутствии насыщения по одному из наименее растворимых его соединений гидроксиду $Th(OH)_4$ пересыщены по ThO_2, индексы насыщения изменяются в пределах 5,17–6,98. По урану из представленных в результатах расчётов соединений ($(UO_2)_3(PO_4)_2$(s), UO_2HPO_4(s), $UO_2SeO_4 \bullet 4H_2O$(s), UO_3(s), ураноцирцит $Ba(UO_2)_2(PO_4)_2 \bullet 10H_2O$, USb_2(s)) насыщение не достигается. Формы нахождения элементов и соединения для определения насыщения по [14] подбираются самой программой. Прямые расчёты показывают насыщение рассматриваемых вод по натриевому ураноспиниту $NaUO_2AsO_4$ (произведение растворимости его $1{,}33 \bullet 10^{-22}$ [1]), что отмечалось и по минеральным озёрам [4]. С $KHSiUO_6 \bullet H_2O$, наименее растворимым соединением щелочных металлов с уранил-силикатом, произведение растворимости которого по [8] равно $10^{-22{,}40}$, воды неравновесны.

Изложенные результаты показывают, что концентрации урана в водах зоны техногенеза рассмотренных месторождений в большинстве соответствуют фоновым, случаи повышенных концентраций (более 10 мкг/л) обусловлены не гидрогеохимическими условиями его миграции, а, по всей вероятности, локальной обогащенностью им источников выноса – руд или вмещающих пород. Максимальное содержание в воде тория вызвано, предположительно, наличием в аллювии долины р. Дарасун монацита. Основными формами водной миграции обоих радионуклидов являются комплексы с карбонат-ионом, несмотря на низкие его содержания и околонейтральные значения pH.

Литература

1. Белова Л. Н. Зоны окисления гидротермальных месторождений урана. – М.: Недра, 1975. – 158 с.
2. Ветров В. А., Кузнецова А. И., Склярова О. А. Базовые уровни химических элементов в воде оз. Байкал // География и природные ресурсы, 2013. – № 3. – С. 41–51.
3. Замана Л. В., Флешлер В. И. Радиоэкологическая обстановка на площади Балей-Тасеевского рудного поля (Восточное Забайкалье) // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Мат. V Междунар. конф. (Томск, 13–16 сент. 2016). – Томск: STT, 2016. – С. 251–254.
4. Замана Л. В, Борзенко С. В. Уран и торий в минеральных водах Забайкалья // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Мат. V Междунар. конф. (Томск, 13–16 сент. 2016). – Томск: STT, 2016. – С. 247–251.
5. Замана Л. В, Таскина Л. В. Геохимия дренажных вод золоторудных месторождений Дарасунского рудного поля // Аспирант. Приложение к Вестнику ЗабГУ, 2018. – № 2 (12). – С. 41–47. – DOI: 10.21209/2074915520181224147.
6. Замана Л. В., Абрамова В. А.., Хвостова Т. Е., Чечель Л. П. Соединения азота в водах зоны техногенеза рудных месторождений Восточного Забайкалья // Горный журнал, 2020. – № 3. – С. 31–35. – DOI: 10.17580/gzh.2020.03.
7. Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии: Справ. изд. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1989. – 448 с.

8. Нипрук О. В., Черноруков Н. Г., Захарычева Н. С., Кулешова Н. В. Исследование состояния ураносиликатов и ураногерманатов щелочных элементов в насыщенных водных растворах // Радиохимия, 2013. – Т. 55. – Т. 2. – С. 136–143.
9. Основные черты геохимии урана / под ред. академика А. П. Виноградова. – 2-е изд,. стереотипное и исправленное. – Томск: STT, 2013. – 374 с.
10. Прокофьев В. Ю., Зорина Л. Д., Коваленкер В. А., Акинфиев Н. Н., Бакшеев И. А., Краснов А. Н., Юргенсон Г. А., Трубкин Н. В. Состав, условия формирования руд и генезис месторождения золота Талатуй (Восточное Забайкалье) // Геология рудных месторождений, 2007. – Т. 49. – № 1. – С. 37–76.
11. Прокофьев В. Ю., Бортников Н. С., Коваленкер В. А., Винокуров С., Зорина Л. Д., Чернова А. Д., Кряжев С. Г., Краснов А. Н., Горбачева С. А. Золоторудное месторождение Дарасун (Восточное Забайкалье. Россия): химический состав, распределение редких земель, изучение стабильных изотопов углерода и кислорода в карбонатах рудных жил // Геология рудных месторождений, 2010. – Т. 52. – № 2. – С. 91–125.
12. Спиридонов А. М., Зорина Л. Д., Китаев Н. А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. – Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2006. – 291 с.
13. Юргенсон Г. А., Юргенсон Т. Н. Дарасунское рудное поле // Месторождения Забайкалья / Коллектив авторов. Под ред. акад. Н.П. Лаверова (в 2 книгах). – М.: Геоинформмарк, 1995. – Т. I. – Кн. II. – С. 3–18.
14. Felmy A. R.., Girvin D. C., Jenne E. A. MINTEQ – A computer program for calculating aqueous geochemical equilibria. Athens, GA.: U.S. Environmental Protection Agency, 1984. – 98 p.

РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗОТОПЫ И ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПОЧВАХ СЕВЕРОДВИНСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА

Е. Н. Зыкова, Е. Ю. Яковлев, С. Б. Зыков

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова РАН
Архангельск, Россия, abs2417@yandex.ru

RADIOACTIVE ISOTOPES AND HEAVY METALS IN SOILS OF THE SEVERODVINSK INDUSTRIAL REGION

E. N. Zykova, E. Yu. Yakovlev, S. B. Zykov

Federal Centre for Integrated Arctic Research named after N. P. Laverov RAS
Archangelsk, Russia, abs2417@yandex.ru

This article presents the results of determining the activity concentrations of ^{137}Cs, ^{40}K, plutonium, and some heavy metals in soil samples from four sites around the Severodvinsk industrial region. The results were obtained during the years 2017–2018. The activities and distribution of plutonium in soils were determined. It was found that the content of ^{137}Cs and $^{239+240}$Pu is higher at the tops of the slopes of the studied areas compared to the foot. The distribution of radionuclides and heavy metals across the three layers of soil had specific differences.

Введение

Загрязнение окружающей среды является одной из основных антропогенных угроз. Северодвинский промышленный район, расположенный на берегу Белого моря в северо-западной части Архангельской области сформировался в 40–60 годы 20 века. в связи с развертыванием на этой территории одного из крупнейших в мире предприятий атомного судостроения. Территория вокруг Северодвинского промышленного района подвержена загрязнению от деятельности предприятий входящих в состав промышленного комплекса. В этот состав входят предприятия машиностроения, металлургии, химические производства, а также электростанции, работающие на каменном угле и газе. Кроме того постоянное наличие на предприятии судов с ядерными силовыми установками требует пристального внимания к мониторингу территории вокруг Северодвинского промышленного района, особенно к таким радиоактивным элементам как ^{137}Cs и Pu в совокупности с тяжелыми металлами [1]. Целью данной работы было определить содержание гамма-излучающего техногенного элемента ^{137}Cs и природного ^{40}K в почвах вокруг Северодвинского промышленного района. Кроме того важной задачей было определить в этих пробах активность техногенного альфа-излучающего радионуклида $^{239+240}$Pu. На основе этих определений была поставлена задача: выявить распределение данных изотопов по трем почвенным горизонтам,

их распределение по пути вершина – склон – подножие холма и выявить возможные корреляции между всеми этими параметрами. Дополнительной задачей являлось определение валовой концентрации Pb, Zn, Ni, Cd, и Fe, выявление корреляций между ними и радиоактивными элементами, поскольку данный аспект тоже имеет заметное значение и исследовался многими учеными [2].

Материал и методы

Исследованные образцы почвы были собраны в мае и сентябре 2018 года. Пробные участки находились в 8–12 км юго-западнее и юго-восточнее от Северодвинского промышленного района. По геологической структуре оба участка одинаковы, подстилаются сходными горными породами и четвертичными отложениями. Участки были выбраны таким образом, чтобы они включали в себя возвышенный участок, склон и подножие склона. Образцы почвы в количестве 36 штук были взяты с данных пробных площадок с вершин, склонов и у подножья холмов. Высота холмов составляла от 10–12 м (участки 1 и 2) до 15–18 м на участке 3 и 4. Глубина отбора проб составляла 15 см. Пробы нарезали в лаборатории на слои толщиной 5 см. Сначала все измельченные и гомогенизированные образцы были подготовлены для гамма-спектрометрических измерений активности ^{137}Cs и ^{40}K с помощью низкофонового ППД гамма-спектрометра «Canberra». Полученные спектры обрабатывали с использованием программного обеспечения спектрометра «Genie-2000». Измерения альфа активных изотопов плутония проводились на альфа спектрометре «Прогресс-альфа» с полупроводниковым детектором с экспозицией 15–20 часов. Спектры анализировали с помощью программного обеспечения «Прогресс 3.20» [3]. Измерение концентраций тяжелых металлов проводилось на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (AES-ICP).

Результаты и их обсуждение

Результаты представленные на рисунке 2 были получены с 4 участков из трех слоев почвы с глубины 0–5 см, 5–10 см и 10–15 см для γ-излучателей ^{137}Cs, ^{40}K, и α-активного $^{239+240}$Pu. Несмотря на относительно небольшие расстояния одного участка от другого, концентрации цезия и плутония были различны как на вершинах, так и у подножия склонов. В образцах с пробного участка 1 активность ^{137}Cs варьировала от 16,4 Бк/кг (вершина склона, глубина 10–15 см) до 103,6 Бк/кг (подножие склона, глубина 0–5 см), с промежуточным значением на склоне в 53,03 Бк/кг. В образцах со второго пробного участка оно имело минимальные значения 20,3 Бк/кг (вершина склона, глубина 5–15 см) достигая максимальных показателей 94,6 Бк/кг у подножия склона в пробе, отобранной из горизонта 0–5 см. На участках отбора 3 и 4 проявилась следующая картина. Минимальные значения ^{137}Cs были зафиксированы в горизонте 10–15 см активностью в 12,8 Бк/кг (участок 4) и в горизонте 10–15 см на склоне участка 3 (10,4 Бк/кг). Максимальные значения были характерны для верхних горизонтов и доходили до 63,7 Бк/кг (участок 3). В целом проявлялась такая зависимость распределения цезия, что максимальные значения активности находились в верхних горизонтах на вершинах и подножия холмов. Если рассматривать его распределение вниз по склону, то вырисовывается такая зависимость, что происходит частичный смыв ^{137}Cs вниз с накоплением в верхнем горизонте у его подножия. Минимальные значения цезия по всем горизонтам наблюдаются в пробах, отобранных на склоне. Вертикальное распределение по горизонтам показало, что максимальные значения активности ^{137}Cs находятся в верхних горизонтах вне зависимости от расположения профиля ввиду его активной сорбции растениями, использующими его как суррогат калия на обедненных им почвах.

Результаты для α-излучателя $^{239+240}$Pu были сопоставимы на всех четырех площадках как на вершине, так и у подножия склона. Наблюдается линейная зависимость уменьшения плутония с глубиной, что характерно для этого изотопа. Максимальная концентрация плутония наблюдается на площадке № 4 в районе оз. Кудемское (6,75 ± 0,9 Бк/кг). Только пробы из верхних горизонтов со склона второго, склона и подножия третьего участков значительно отклоняются от типичной прямой зависимости распределения плутония. Относительно высокие активности для этих трех образцов могут, скорее всего, свидетельствуют о наличии в них плутония возникшего в ядерном реакторе, выброшенного и перенесенного воздушными массами на данную местность в виде «горячей частицы» вследствие Чернобыльской аварии. Разница в концентрациях цезия и плутония в пробах почвы может быть вызвана также климатическими условиями. Концентрация активности цезия и плутония обычно уменьшаются с глубиной, и наибольшие значения находятся в самых верхних слоях почвы, что и было подтверждено в данном исследовании. Значения активности природного изотопа ^{40}K для всех образцов почвы была различна (рисунок 1). Это обусловлено его количеством в горной породе, подстилающих почву четвертичных отложениях и наличием его в минеральной фракции почвы. Активность ^{40}K была прямо пропорциональна общей активности калия в почве, а удельная активность природного

калия всегда равна 31,7 Бк/г. Наибольшая активность калия была обнаружена в слоях 5–10 и 10–15 см и достигала максимума в 576,1 Бк/кг у подножия склона на участке № 4 в горизонте 5–10 см. В процессе исследований не было выявлено зависимости в концентрации калия с расположением точ-

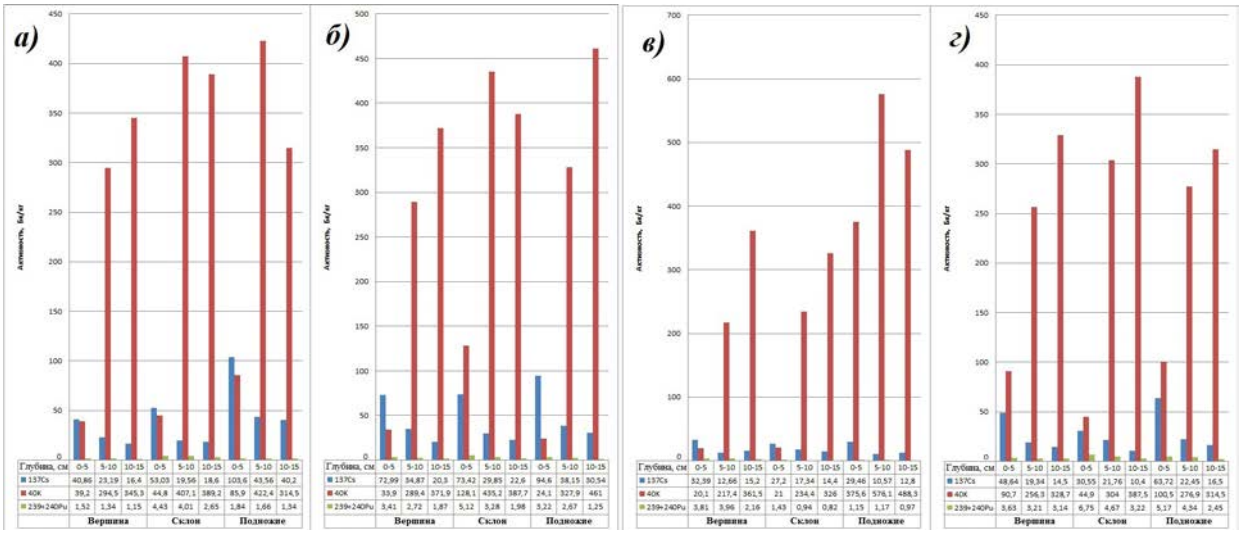


Рис. 1. Распределение изотопов в пробах почв вокруг Северодвинского промышленного района; а) пробный участок № 1; б) пробный участок № 2; в) пробный участок № 4; г) пробный участок № 3

ки отбора пробы на склоне. В целом активность ^{40}K сходна со значениями, замеренными ранее в почвах на данной территории [4].

Было проведено исследование содержания некоторых тяжелых металлов (Zn, Pb, Cd, Ni) и железа в пробах почв, взятых с данных пробных площадок. В общем, концентрация этих металлов существенно не отличается от значений из образцов почв верхнего почвенного горизонта A_oA_1 отобранных ранее на данной территории [5]. Распределение тяжелых металлов было обратным по сравнению с изотопами. Максимумы концентраций тяжелых металлов обнаружены у подножия склонов, а минимумы в пробах, отобранных на склонах. Такая же зависимость наблюдается и в распределении по исследованным горизонтам, где минимальные значения обнаруживаются в верхнем горизонте. Большинство исследованных образцов почвы были загрязнены этими металлами, а в некоторых случаях концентрации Pb, Cd и Fe были близки к предельно допустимым. Подстилающие породы этих почв содержат: 20–36 Zn, 8–17 Pb и 0,4–1,0 Cd (мг/кг). Интересное наблюдение может быть сделано из образцов почвы с 2 и 4 пробной площадки. В пробе у подножия холма в горизонте 5–10 см со второго участка была отмечена повышенная концентрация свинца (24,3 мг/кг) и кадмия (2,6 мг/кг). Тогда как в пробе у подножия холма (горизонт 5–10 см) на участке № 4 наблюдалась более высокая концентрация цинка и железа (45,2 мг/кг и 743 мг/кг соответственно). Минимальные значения Ni зафиксированы в пробах на склонах в верхних горизонтах и колеблются от 3,2 до 4,7 мг/кг, а максимальные в горизонте 10–15 см (до 20,3 мг/кг на участке № 3). Концентрация этих металлов в пробах почвы чаще всего зависит от выбросов промышленных предприятий, и в некоторой степени от большого содержания органических веществ.

Заключение

Распределение ^{137}Cs показало максимальные значения активности его в верхних горизонтах почвы, на вершинах и у подножия холмов. Также стало понятно, что происходит частичный смыв ^{137}Cs вниз по склону с накоплением в верхнем горизонте почвы у подножия. Максимальные значения активности ^{137}Cs, как правило, находятся в верхних горизонтах почв. Подтвердилась прямая зависимость уменьшения активности плутония с глубиной. Заметна некоторая корреляция между ^{137}Cs и $^{239+240}Pu$. Наибольшая активность естественного изотопа ^{40}K была обнаружена в слоях 5–10, 10–15 см и корреляции с ^{137}Cs не обнаружено. Не было выявлено зависимости и в активности калия с расположением точки отбора пробы на склоне. Изучение некоторых тяжелых металлов и железа показало, что большинство исследованных образцов почвы были загрязнены этими металлами. Распределение тяжелых металлов было обратным по сравнению с изотопами. Максимумы концентраций тяжелых металлов обнаружены у подножия склонов, а минимумы в пробах, отобранных на склонах.

Литература

1. Popov L., Michailova G., Naidenov I. Determinanion of activity ratios of Pu-238, Pu-239+240, Pu-241, Am-241, Cs-134, Cs-137 and Sr-90 in Bulgarian soils. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2010. – Vol. 285. – P. 223–237.
2. Kubica B., Mietelski J. W., Golas J., Skiba S., Tomankiewicz E., Gaca P., Jasinska M., Tuteja-Krysa M. Concentration of ^{137}Cs, ^{40}K, ^{238}Pu and $^{239+240}$Pu radionuclides and some heavy metals in soil samples from two main valleys from Tatra national park. Polish Journal of Environmental Studies, 2002. – Vol. 11. – № 5. – P. 537–545.
3. Методика измерений удельной активности изотопов плутония (^{238}Pu, $^{239+240}$Pu) в пробах почв, грунтов, донных отложений и горных пород альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой. – М.: ФГУП ВИМС, 2013. – 15 с.
4. Abramenkovs A., Klavins M., Rudzitis J., Popelis A. Investigation of radionuclide sorption on peat. Latvian Journal of Chemistry, 2012. – № 4. – P. 342–346.
5. Зыкова Е. Н., Зыков С. Б., Яковлев Е. Ю., Ларионов Н. С. Сравнительно-временной анализ содержания тяжелых металлов в аномальных зонах почв Северодвинского промышленного района // Успехи современного естествознания, 2018. – № 8. – С. 130–135.

ОСОБЕННОСТИ ДОЛГОСРОЧНОГО ПЛАНА ПО ВЫВОДУ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ НА АЭС «ФУКУСИМА-ДАЙИТИ»

Р. Д. Иборатшоев

Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе (МГРИ)
Москва, Россия, iboratshoevrd@mgri.ru

FEATURES OF THE LONG-TERM PLAN FOR DECOMMISSIONING AND ELIMINATION OF CONSEQUENCES AT THE FUKUSHIMA DAIICHI NUCLEAR POWER PLANT

R. D. Iboratshoev

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting MGRI
Moscow, Russia, iboratshoevrd@mgri.ru

The article provides an overview and analysis of the features of the plan for eliminating the consequences of the accident at the Fukushima Daiichi NPP (Japan), and considers the main measures for the decommissioning of power units. The work used official reports and materials from the Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan and TEPCO, the plant operator, as well as reviews, and information from the International Atomic Energy Agency (IAEA).

Введение

В 2011 году близ берегов острова Хонсю произошло одно из самых сильнейших землетрясений в истории Японии магнитудой 9,0 баллов и серией афтершоков магнитудами 7,0–7,4 баллов, получившее название «Великое восточно-японское землетрясение». Данное стихийное явление вызвало крупное цунами и наводнение прибрежной части Японии, в зоне которой располагалась атомная электростанция «Фукусима-Дайити». В результате действия природных катаклизмов на станции была затоплена основная территория «атомного острова», что привело к аварийной ситуации и радиационной аварии, в ходе которой последовательно прошли взрывы на трех энергоблоках, в атмосферу попали радиоактивные элементы, а в реакторах произошло расплавление активной зоны. По международной шкале ядерных и радиологических событий INES этому случаю был присвоен наивысший балл – уровень 7, с тяжелыми последствиями для здоровья населения и окружающей среды.

Материалы и методы

В работе использованы официальные отчеты и материалы Министерства экономики, торговли и промышленности Японии и компании TEPCO – оператора станции, а также обзоры и информация Международного агентства по атомной энергии МАГАТЭ.

Результаты и их обсуждение

В сентябре 2011 года правительством Японии была создана «Корпорация по содействию возмещения компенсации от ядерного ущерба» (Nuclear Damage Compensation Facilitation Corporation – NDF) для оперативного осуществления компенсационных выплат эвакуированному населению.

В декабре 2011 года оператор станции (компания TEPCO Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.) разработал план мероприятий послеаварийного восстановления «Среднесрочная и долгосрочная дорожная карта по выводу из эксплуатации предприятия TEPCO на АЭС Фукусима-Дайити, энергоблоки 1–4», который с течением времени и определенными выполненными работами дополнялся и пересматривался. С 27 декабря 2019 года опубликована и действует пятая редакция данной дорожной карты с учетом мнений местных жителей и специалистов, а также международных обзоров группы экспертов МАГАТЭ [1].

В сентябре 2013 года правительство Японии создает Межведомственный совет по вопросам загрязненных вод и вывода из эксплуатации (The Inter-Ministerial Council for Contaminated Water and Decommissioning Issues) для координации, мониторинга и контроля мероприятий по выводу из эксплуатации станции.

В августе 2014 года NDF была реорганизована и переименована в «Корпорацию по содействию возмещения компенсации от ядерного ущерба и выводу из эксплуатации» (Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation – NDF), включив в свою деятельность такие функции, как поддержка вывода из эксплуатации реакторов на АЭС «Фукусима-Дайити» и управление резервным фондом для этих целей [2].

По запросу правительства Японии, МАГАТЭ организовало четыре миссии Международной экспертной оценки «дорожной карты», проходившие в апреле, ноябре, декабре 2013 года, в феврале 2015 и ноябре 2018. Эти миссии были направлены на оказание помощи правительству Японии в реализации мероприятий «дорожной карты», а также на расширение международного сотрудничества, обмен с международным сообществом информацией и знаниями об аварии в процессе будущего вывода из эксплуатации [3].

Согласно плану «дорожной карты» [1], ликвидация последствий аварии и вывод из эксплуатации АЭС должны осуществляться безопасно и стабильно в течение 30–40 лет. Были определены основные этапы ликвидационных мероприятий (рис. 1):

1) Фаза 1 (в течение двух лет с момента холодного останова реакторов): после достижения состояния холодного останова реакторов (было достигнуто в декабре 2011 года) до начала удаления топлива из бассейнов отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) энергоблоков. Данная фаза завершилась 18 ноября 2013 года, когда начался вывоз топлива из бассейна ОЯТ энергоблока 4.

2) Фаза 2 (плановый период: в течение 10 лет с момента холодного останова реакторов): после окончания Фазы 1 и до начала извлечения топливных отходов из энергоблоков. В настоящий момент полным ходом проводятся научно-исследовательские работы, внутреннее обследование реакторов, инженерное проектирование систем доступа к поврежденным участкам и выгрузки топливных отходов в условиях высоких уровней радиации. Продолжается откачка и очистка стоячей воды в зданиях и вывоз топлива из бассейнов ОЯТ.

3) Фаза 3 (плановый период: 30–40 лет с момента холодного останова реакторов): после окончания Фазы 2 до демонтажа и завершения вывода из эксплуатации станции. На этом этапе предусматривается извлечение топливного расплава и отходов до стадии полного завершения вывода из эксплуатации станции. Период с начала поиска топливного мусора до конца 2031 года обозначается как «Фаза 3-(1)». В фазе 3-(1) ожидается завершение удаления топлива из бассейнов ОЯТ на всех энергоблоках 1–6. Основной задачей фазы 3 является поиск топливных обломков, для чего будут проведены испытательные работы. Количество образующейся загрязненной воды должно быть сведено к минимуму и поддерживаться стабильно. Касаемо процедур обращения с отходами, то снижению риска будет способствовать ликвидация временных складов для строительных обломков, мусора и других материалов.

Для оценки прогресса проведения восстановительных работ в период от фазы 2 до фазы 3-(1) были установлены основные меры, целевые процессы, показатели и временные рамки, приведенные в таблице 1.

Со времени аварии на АЭС «Фукусима-Дайити» прошло 10 лет и фаза работ по выводу из эксплуатации переходит от краткосрочного реагирования к среднесрочному и долгосрочному. За этот период были решены следующие задачи:

- стабилизация на определенном уровне мер по управлению загрязненными водами, которые требовали экстренного реагирования сразу после аварии;
- завершение удаления топлива из бассейна ОЯТ в блоке 4 и начало удаления топлива из бассейна ОЯТ в блоке 3;
- достигнуто значительное снижение дозы облучения на территории электростанции.

На данный момент, мероприятия по извлечению топливного расплава и обломков являются основой рабочего процесса для общего проекта вывода из эксплуатации станции.

Стратегия ликвидации последствий аварии придерживается общей концепции снижения риска, вы-

званного радиоактивными материалами, обеспечения безопасности персонала, минимизации влияния на окружающую среду. Для этого были определены основные источники риска на АЭС «Фукусима-Дайити» [5]:

1. топливные обломки реакторов (в блоках 1–3);
2. отработавшее ядерное топливо:
   2.1. тепловыделяющие сборки в бассейнах ОЯТ (в блоках 1–3);
   2.2. тепловыделяющие сборки, хранящиеся в общем бассейне хранения ОЯТ;
   2.3. тепловыделяющие сборки, хранящиеся в сухих бочках;
3. мешки с цеолитом (размещены на цокольных этажах главного технологического корпуса и здания высокотемпературной мусоросжигательной установки);
4. загрязненная вода:
   4.1. стоячая вода в зданиях (скопившаяся в зданиях реакторов, корпусах турбин энергоблоков 1–4, главном технологическом корпусе

Рис. 1. Календарный план и схема основных периодов вывода из эксплуатации АЭС «Фукусима-Дайити» [4]

Таблица 1. Основные этапы и целевые показатели дорожной карты со статусом выполнения (по состоянию на март 2021 г.) [6]

Этап	Показатель выполнения и описание процесса	Период выполнения
Меры по уменьшению объемов загрязненной воды	Снизить количество образующейся загрязненной воды до 150 м^3/день*[1]	Выполнено в течение 2020 г.
	Снизить количество образующейся загрязненной воды до 100 м^3/день*[1]	В течение 2025 г.
Очистка остаточной/ хранящейся воды	Завершена очистка скопившейся воды в здании*[2]	Выполнено в течение 2020 г.*[2]
	Понижение уровня воды в здании реакторов примерно до половины	2022–2024 гг.
Удаление топлива	Завершение вывоза топлива энергоблоков 1–6	В течение 2031 г.
	Завершение установки защитной большой крышки блока 1	К 2023 г.
	Начало удаления топлива из блока 1*[3]	2027–2028 гг.
	Начало удаления топлива из блока 2*[3]	2024–2026 гг.
Вывоз топливного мусора	Начало вывоза обломков топлива с 1-го блока (начато с 2-го энергоблока). Постепенное расширение масштабов вывоза	В течение 2021 г.*[4]
Меры по обращению с отходами	Поиск технических решений для мер по обработке/утилизации и их безопасность	2021 г.
	Исключение временного хранения на открытом воздухе	К 2028 г.

*[1] С дальнейшим снижением данных объемов; *[2] Исключая блоки 1–3, здание реактора, технологический корпус и здание высокотемпературной мусоросжигательной установки; *[3] Изменена очередность удаления топливных обломков для обеспечения безопасности и предотвращения разлета; *[4] Ожидается, что задержка будет примерно на год из-за распространения новой коронавирусной инфекции (COVID-19).

и здании высокотемпературной мусоросжигательной установки, а также осадок, содержащий радионуклиды, на дне зданий блоков 1–3);

4.2. хранящаяся на территории станции вода в сварных резервуарах, очищенная от основной группы радионуклидов (кроме трития) с помощью высокоэффективной системы очистки ALPS;

4.3. остаточная вода во фланцевых резервуарах;

5. вторичные отходы, образующиеся при очистке воды:

5.1. отработанные адсорбенты и емкости для адсорбции отходов;

5.2. суспензия и шлам, образующиеся во время обработки и очистки вод с помощью системы ALPS (хранятся в контейнерах с высокой герметичностью HIC);

5.3. осадки, образующиеся в результате дезактивации (флокулянты при работе системы обеззараживания);

5.4. концентрированные жидкие отходы (при разбавлении концентрированной соленой воды) и карбонатный шлам;

6. каменный материал, обломки, грунт, строительный мусор, деревья и растительность:

6.1. склад твердых отходов (обломочный материал с дозой 30 мЗв/ч и выше);

6.2. временное хранилище (обломочный материал засыпан грунтом или хранится в контейнерах, деревья и растительность, с дозой 1–30 мЗв/ч);

6.3. хранение на открытом воздухе (обломочный материал в складских помещениях под навесом 0,1–1 мЗв/ч, на открытом воздухе с дозой ниже 0,1 мЗв/ч, деревья и растительность);

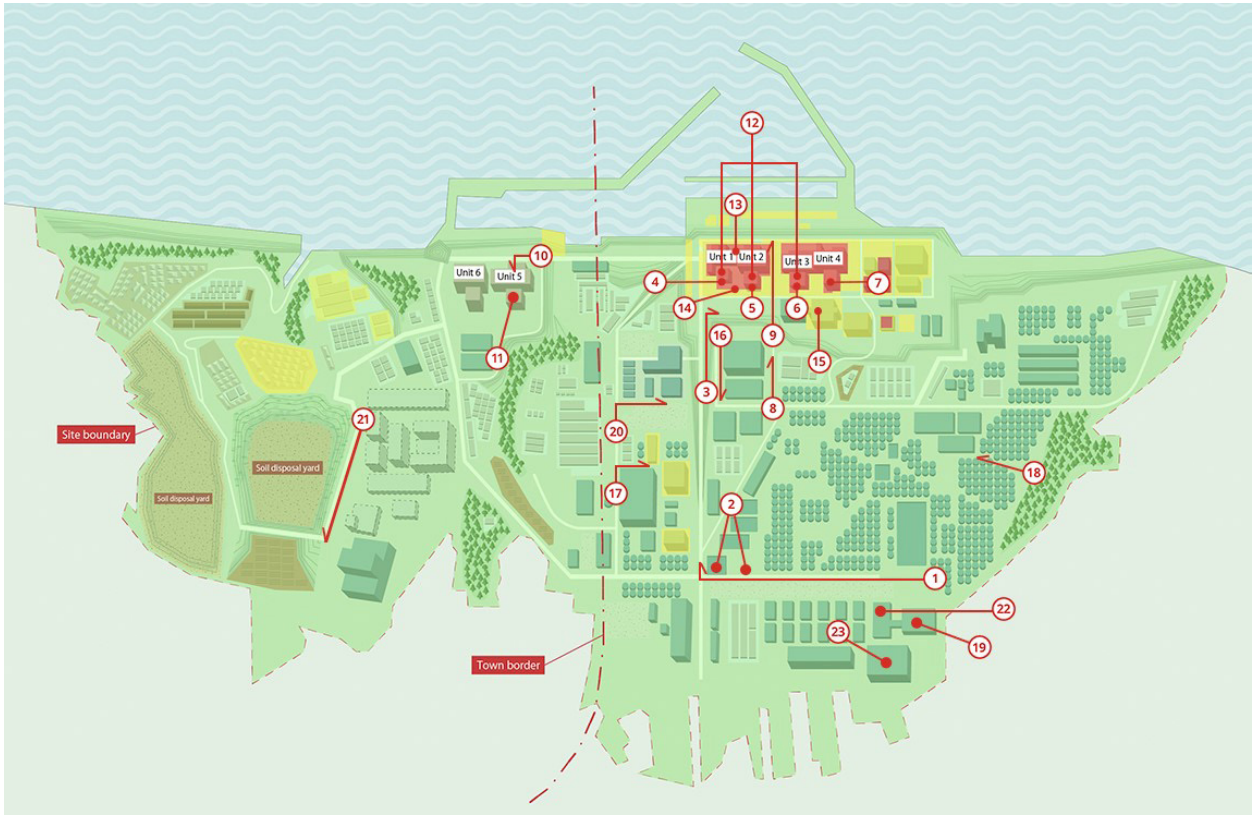


Рис. 2. Схема территории вывода из эксплуатации АЭС «Фукусима-Дайити» [7]

зеленая зона – низкий уровень загрязнения (персонал может носить простые респираторы и обычную униформу); желтая зона – средний уровень загрязнения (персонал должен носить защитную одежду и маску, полностью или частично закрывающую лицо); красная зона – высокий уровень загрязнения (персонал должен носить защитную спецодежду и маску, закрывающую все лицо); 1 – въезд на территорию АЭС; 2 – парковка внутреннего транспорта; 3 – терраса перед зданиями энергоблоков; 4 – блок 1; 5 – блок 2; 6 – блок 3; 7 – блок 4; 8 – дезактивированная забетонированная дорога; 9 – зона между блоками 2 и 3; 10 – блок 5; 11 – турбинный зал блока 5; 12 – пульт управления и аппаратура для исследования расположения расплавленного топлива в реакторах; 13 – главный щит управления блоков 1–2; 14 – вентиляционная труба блоков 1–2; 15 – общее хранилище ОЯТ; 16 – холодильная камера и установка закачки хладагента; 17 – зона очистки загрязненных вод (установки Kurion, SARRY, MRRS, ALPS); 18 – площадь резервуаров с очищенной водой; 19 – лаборатория химического анализа; 20 – главный корпус – центр экстренного реагирования; 21 – подготовка площадки для очистных сооружений; 22 – дом отдыха; 23 – новое административное здание.

7. загрязненные конструкции в зданиях (строительные конструкции, оборудование, узлы установок, трубы, соединительные узлы, компоненты и другие элементы внутри зданий энергоблоков, загрязненные радиоактивными материалами в результате аварии; и активированные материалы, образовавшиеся в процессе эксплуатации до аварии).

Основными проблемами при выводе из эксплуатации станции в текущей перспективе являются следующие особенности состояния энергоблоков:

- большое количество радиоактивных материалов, оказывающих значительное влияние на внутреннее облучение, находится в необычных и различных атипичных формах;
- барьеры защиты частично повреждены (здания реакторов и первичная защитная оболочка PCV);
- значительные осложнения в определении точного состояния вышеперечисленных радиоактивных материалов и защитных барьеров;
- из-за высоких уровней радиации возникли трудности с доступом к объекту и установкой контрольно-измерительных приборов и оборудования для получения информации на месте;
- текущий уровень радиации высок и есть опасения по поводу дальнейшего разрушения защитных барьеров, для чего необходимо принять соответствующие меры без продления работ по выводу из эксплуатации.

Вся территория станции и прилегающая площадь разделены на зоны расположения объектов дезактивации и зоны основных источников риска (рис. 2).

Заключение

Оператор станции (компания TEPCO), совместно с подрядчиками – ликвидаторами последствий аварии, под присмотром правительственных регуляторов, местных жителей и сообществ, а также профессиональных ассоциаций (МАГАТЭ), строго выполняют плановые работы по выводу АЭС «Фукусима-Дайити» из эксплуатации. Переход к следующей фазе «дорожной карты» будет возможен при совершенствовании научно-исследовательских и опытно-конструкторских решений для проведения испытаний, поиска, обнаружения и выгрузки расплавленного топлива из реакторов пострадавших энергоблоков.

В течении 2021 года будет принято окончательное решение по утилизации хранящейся на территории станции очищенной воды в резервуарах. Наиболее вероятный вариант – выпуск данных вод в морское пространство. В ближайшее время начнется ликвидация временных складов и хранилищ собранных отходов, каменного материала, грунтов, деревьев и растительности.

На объекте действует повышенная готовность медицинского персонала, который оперативно реагирует на несчастные случаи на производстве, приняты меры по максимальному снижению профессионального риска, проведено совершенствование стандартов безопасности и мер по управлению здравоохранением. Расчетное значение эффективной дозы на границах участка станции достигло целевого значения менее 1 мЗв/год. Одной из важных задач остается обеспечение безопасности для условий постепенного возвращения местных жителей и проведения восстановительных работ в прилегающих районах.

Литература

1. Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. The Inter-Ministerial Council for Contaminated Water and Decommissioning Issues. December 27, 2019 [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20191227_3.pdf (дата обращения: 11.04.2021).
2. The Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation (NDF) [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: https://www.ndf.go.jp/files/user/soshiki/pamph_e.pdf (дата обращения: 11.04.2021).
3. Review Report. IAEA Follow-up Review of Progress Made on Management of ALPS Treated Water and the Report of the Subcommittee on Handling of ALPS treated water at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Vienna, Austria, 2 April 2020 [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/20/04/review-report-020420.pdf (дата обращения: 11.04.2021).
4. Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4 [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/ (дата обращения: 11.04.2021).
5. Technical Strategic Plan 2020 for Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: https://www.dd.ndf.go.jp/files/user/pdf/en/strategic-plan/book/20201214_SP2020eOV.pdf (дата обращения: 11.04.2021).
6. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: https://www.tepco.co.jp/decommission/project/roadmap/index-j.html (дата обращения: 19.04.2021).

7. Inside Fukushima Daiichi - Virtual tour [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: https://www.tepco.co.jp/en/insidefukushimadaiichi/index-e.html (дата обращения: 19.04.2021).

ОРГАНИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДЗЕМНОГО СКВАЖИННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ НА ПРИРОДНЫЕ ВОДЫ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЮЖНОГО КАЗАХСТАНА

М. М. Искаков[1], С. К. Кайрамбаев[1], А. А. Урбисинова[1],
Р. С. Жунусов[2], Р. Б. Беремжанов[3], Е. Н. Панова[3]

[1]АО «НАК «Казатомпром»
Нур -Султан, Казахстан
miskakov@kazatomprom.kz, skairambayev@kazatomprom.kz, aurbisinova@kazatomprom.kz
[2]АО «Волковгеология»
Алматы, Казахстан, zhunussov.rakhman@gmail.com
[3]ТОО «Институт высоких технологий»
Алматы, Казахстан, r.beremzhanov@iht.kazatomprom.kz, e.panova@iht.kazatomprom.kz

ORGANIZATION OF MONITORING OF THE IMPACT OF UNDERGROUND BOREHOLE LEACHING ON NATURAL WATERS OF URANIUM DEPOSITS IN SOUTH KAZAKHSTAN

M. M. Iskakov[1], S. K. Kairambaev[1], A. A. Urbisinova[1],
R. S. Zhunusov[2], R. B. Beremzhanov[3], E. N. Panova[3]

[1]NAC Kazatomprom JSC
Nur-Sultan, Kazakhstan
miskakov@kazatomprom.kz, skairambayev@kazatomprom.kz, aurbisinova@kazatomprom.kz
[2]Volkovgeologia JSC
Almaty, Kazakhstan, zhunussov.rakhman@gmail.com
[3]Institute of High Technologies LLP
Almaty, Kazakhstan, r.beremzhanov@iht.kazatomprom.kz, e.panova@iht.kazatomprom.kz

The purpose of the work was to determine a single principled approach to the organization and monitoring of the state of natural waters during the implementation of the process of underground borehole leaching of uranium and after its completion at the enterprises of Southern Kazakhstan. The authors proposed to monitor the state of natural waters as production, in the contour of the developed deposit, and environmental monitoring, outside the deposit in the directions to nearby objects of vital activity of the population. Monitoring to the contamination of aquifers will reduce the risk of contamination resulting from the extraction of uranium by underground borehole leaching.

Целью работы является определение единого принципиального подхода к организации и ведению мониторинга состояния природных вод при осуществлении процесса подземного скважинного выщелачивания (ПСВ) природного урана и по его завершении на предприятиях Южного Казахстана.

Процесс ПСВ урана из рудных тел организуется через технологические скважины путем создания оборота растворов, содержащих серную кислоту и фильтрующихся через горнорудную массу в замкнутом цикле.

На стадии активного выщелачивания внедрение технологических растворов в водоносный горизонт сопровождается нарушением режима подземных вод. Растекание технологических растворов регулируется депрессионной воронкой, образуемой величиной дебаланса между закачиваемыми и откачиваемыми растворами. В это время технологические растворы находятся в границах эксплуатационных полигонов.

В процессе сернокислотного ПСВ урана в размещении ореолов загрязнения отдельных компонентов отмечается определенная зональность [1]. Особенно это относится к тем из них, содержание которых в растворе контролируется значением pH. Прежде всего, это уран, который находится обычно во внутренней части ореола с значениями pH < 2,2–2,5. Затем следуют границы распространения Fe^{3+} (pH ~ 3), Al^{3+} (pH ~ 4–5), Fe^{2+} (pH ~ 6), осаждение которых осуществляется в виде гидроксидов по мере нейтрализации

кислоты в фильтрующихся по водоносному пласту растворах. Характерно следующее расположение границ ореолов загрязнений (в направлении фильтрации от рудных залежей):

$$U \rightarrow Fe^{3+} \rightarrow Al^{3+} \rightarrow Fe^{2+} \rightarrow Ca^{2+} \rightarrow NO_3^- \rightarrow SO_4^{2-}$$

Вследствие слабой растворимости сульфата радия ($RaSO_4$) его содержания в продуктивном растворе (ПР) возрастают незначительно – в 2–3 раза от исходных концентраций в водах до начала ПСВ. Снижение концентраций радия в остаточных растворах связано с его соосаждением со слаборастворимыми $BaSO_4$, $SrSO_4$ и $CaSO_4$. По аналогии со стабильным изотопом свинца можно предположить, что содержание Ra^{226} в водах зависит от величины pH. В нейтральных и слабощелочных водах он мигрирует в ограниченных масштабах в виде коллоидных и взвешенных частиц. Полоний в естественных гидрогеохимических условиях образует гидроксид, обладающий хорошей способностью сорбироваться различными материалами, в том числе глинами.

Граница полностью нейтрализованных растворов (pH = 7) формируется обычно на расстоянии 50–70 м от крайних рядов скважин. Катионы щелочных и щелочноземельных металлов (Na^+, K^+, Mg^{2+} и др.) в нейтральной среде подземных вод довольно активно поглощаются породами, в особенности глинистой фракцией.

Большой миграционной способностью обладают анионы NO_3^- и SO_4^{2-}. Сульфат-ион частично образует малорастворимые основные соли некоторых металлов и гипс, в результате чего его количество в растворе постепенно уменьшается. Анион NO_3^- при фильтрации по поровым каналам пород не образует нерастворимых соединений, и общее количество его в растворе практически не изменяется. Однако, в связи с тем, что при сернокислотном выщелачивании содержание аниона SO_4^{2-} в десятки раз выше, чем NO_3^-, он мигрирует дальше и образует внешний контур общего солевого ореола.

Граница ореола загрязнения в период отработки месторождения определяется размером зоны растекания технологических растворов. Главная задача на этапе эксплуатации месторождения – не допустить растекания за пределы рудного тела.

Для контроля за правильностью ведения технологического процесса ПСВ, а также для проведения пострекультивационного мониторинга на предприятиях необходимо оборудовать мониторинговую сеть производственных и экологических наблюдательных скважин.

Наблюдательные скважины производственного мониторинга обычно располагаются внутри контура балансового оруденения и в непосредственной близости от контуров разрабатываемых урановых залежей и не увязаны с близлежащими объектами жизнедеятельности населения (населенные пункты, водозаборы хозяйственно-питьевого назначения, поверхностные воды).

Принято считать, что зона растекания технологических растворов не превышает 50–100 м, вследствие чего расположение наблюдательных скважин определяется «по мере необходимости контроля» за растеканием выщелачивающего и продуктивного растворов. Использование мониторинговой сети производственных наблюдательных скважин на полигонах ПСВ не позволяет с полной уверенностью выполнить прогноз восстановления подземных вод, подверженных наибольшему воздействию технологических растворов. Вопрос устойчивости этих горизонтов, учитывая изменения в минералогическом составе водовмещающих пород, практически никем не изучался и потому не может быть смоделирован в настоящее время [2]. Внешняя сеть наблюдательных скважин экологического мониторинга, простирающаяся по направлению естественного потока вод к местам водозаборов и населенных пунктов, на предприятиях практически отсутствует.

Учитывая вышесказанное, на настоящий момент существует ряд вопросов экологического мониторинга, которые требуют решения:

- контроль за смежными водоносными горизонтами, так как нет убедительных данных по результатам контроля в надрудном и подрудном водоносных горизонтах;
- упорядочение информации об отсутствии негативного воздействия на подземные воды, её интерпретация и сравнение с имеющимися фоновыми значениями до начала отработки месторождений (наличие единой базы данных состояния подземных вод);
- предоставление полученной информации в обобщенном графическом виде, понятном для заинтересованных сторон и доказывающем отсутствие негативного воздействия на подземные воды;
- определение потенциально возможных путей загрязнения;
- проведение мониторинга грунтовых вод или первого от земной поверхности водоносного горизонта.

Наблюдательная сеть экологического мониторинга подземных вод должна обеспечивать надежный контроль растекания остаточных растворов, состояния грунтовых, подземных и поверхностных вод в тесной связи со средой обитания близлежащих населенных пунктов и водозаборов хозяйственно-питьевого назначения в пределах и за пределами добычных залежей урановых месторождений в ходе ПСВ и после его завершения.

В настоящее время на уранодобывающих предприятиях АО «НАК «Казатомпром» отсутствует единый документ, регламентирующий порядок про-

ведения периодического мониторинга состояния природных вод при осуществлении ПСВ урана и по завершении данного процесса.

В данной работе предлагается принципиально новый подход к организации наблюдательной сети экологического мониторинга за состоянием природных (грунтовых, подземных и поверхностных) вод отвода:

• мониторинг состояния природных вод должен проводиться как производственный, в контуре разрабатываемой залежи (наблюдательные скважины, пробуренные на рудный, подрудный, надрудный и смежные горизонты согласно проекту отработки месторождения), так и экологический мониторинг, за пределами залежи в направлениях к близлежащим объектам жизнедеятельности населения (населенные пункты, водозаборы хозяйственно-питьевого назначения, поверхностные воды рек, каналы);

• количество и расположение наблюдательных скважин производственного и экологического мониторинга должно быть предусмотрено в проекте разработки уранового месторождения;

• проектные конструкции наблюдательных скважин экологического мониторинга должны соответствовать конструкциям наблюдательных скважин производственного мониторинга;

• результаты мониторинга должны создать доказательную базу об отсутствии влияния ПСВ на основные жизненно важные объекты геологической среды.

Учитывая вышеизложенное предлагается:

• включение в область наблюдения населенных пунктов (при их наличии), расположенных на расстоянии до 10 км от границы урановой залежи (от крайней технологической скважины), если населенный пункт находится ниже по направлению потока подземных вод от урановой залежи (рис. 1). Расстояние в 10 км принято для создания убедительной доказательной базы об отсутствии негативного влияния ПСВ. Если населенный пункт расположен не по потоку подземных вод от населенного пункта (например, сбоку от залежи), то область наблюдения сокращается до 5 км, так как на таком расстоянии влияние ПСВ уже физически невозможно из-за естественного разбавления и гидро- и биохимического очищения подземных и поверхностных вод [3]. Кроме этого в 100 м от края населенного пункта (крайнее строение) в сторону уранового месторождения должна быть сооружена одна наблюдательная скважина на грунтовые воды (при наличии первого от поверхности водоносного горизонта);

• бурение куста мониторинговых скважин в направлении близлежащих (до 5000 м) населенных пунктов (рис. 2). Куст наблюдательных скважин должен быть расположен на расстоянии 0,5*l* от залежи (*l* – расстояние между урановой залежью и населенным пунктом). Фильтры наблюдательных скважин куста должны быть оборудованы на все имеющиеся водоносные горизонты (рудный, подрудный, надрудный и смежный при их наличии). Глубины скважин должны определяться согласно геолого-гидрогеологическим условиям местности в увязке с горизонтами уранового месторождения;

• бурение куста мониторинговых скважин и одиночных наблюдательных скважин в направлении близлежащих (до 5000 м) водозаборов хозяйственно-питьевого назначения;

• бурение одиночных мониторинговых наблюдательных скважин в направлении близлежащих (до 5000 м) поверхностных водотоков – реки, каналы, озера (при их наличии). Поверхностные воды часто бывают связаны с грунтовыми водами первого от поверхности водоносного горизонта, в связи с чем предусматривается сооружение одной наблюдательной скважины на первый от поверхности водоносный горизонт в 100 м от уреза воды в сторону уранового месторождения. Фильтры наблюдательных скважин должны устанавливаться в центральной части водоносных горизонтов.

Опробование природных вод должно производиться при экологическом мониторинге один раз в год (летний сезон) на полный химический анализ и радионуклидный состав. При этом используются все новые скважины экологического мониторинга, которые были сооружены на каждом месторождении согласно существующих природных геолого-гидро-

Рис. 1. Схема расположения мониторинговых скважин

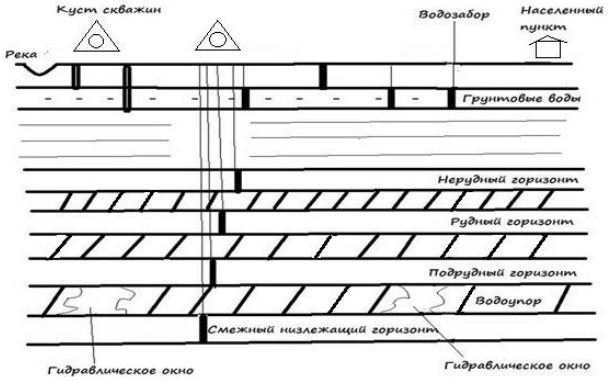


Рис. 2. Схема расположения куста скважин

геологических условий. Данные о геохимическом и радиохимическом составе при проведении экологического мониторинга по подземным и поверхностным водам должны включать следующие виды химических анализов:

- полный химический анализ подземных вод с определением следующих элементов: pH, Eh, HCO_3, SO_4, U, Na, K, Ca, Mg, Fe^{+2}, Fe^{+3}, SiO_2 , NO_2, NO_3, H_2SO_4, сухой остаток;
- микрокомпонентный состав: Mn, Al, Ba, Be, Cd, Cu, Mo. As, Ni, Hg, Pb, Se, Sr, Cr, Zn, F, Cl;
- радионуклидный состав: Po^{210}, Ra^{226}, Pb^{210}, Th^{230}, Th^{232}, Ra^{228}, U^{234},U^{238};
- суммарная альфа- и бета-активность.

Основной целью гидрогеорадиохимического опробования при экологическом мониторинге является контроль состояния подземных вод не только в период ПСВ, но и после его окончания, а также прослеживание возможного загрязнения среды обитания человека в районе добычи урана. Все полученные результаты по химическому составу вод должны сопоставляться с первоначальными фоновыми показателями и предельно допустимыми концентрациями для каждого химического элемента – потенциального загрязнителя подземных и поверхностных вод.

Необходимо улучшать методы интерпретации данных мониторинга, чтобы получать убедительные доказательства, что каждый рудник ПСВ не оказывает отрицательного воздействия на подземные воды. Результаты интерпретации данных мониторинга в последующем необходимы для определения целей и критериев ликвидации добычных полигонов, а также информирования населения об экологической безопасности ПСВ урана.

Литература

1. Юдин С. С. Эколого-экономические проблемы реабилитации подземных вод на урановых месторождения // Эколого-географический вестник Юга России. – РГУ, 2001. – Вып. 1. – С. 75–80.
2. Каюков П. Г. Постэксплуатационный мониторинг подземных вод. Семинар по вопросам рекультивации отработанных блоков ПСВ урана: // Алматы, 2003 г. – НАК «Казатомпром». – С. 23–25.
3. Бровин К. Г., Грабовников В. А. Прогноз, поиски, разведка и промышленная оценка месторождений урана для отработки подземным выщелачиванием. – Алматы, 1997. С. 375.

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ, ПРИЛЕГАЮЩИХ К РУДНИКАМ ПОДЗЕМНОГО СКВАЖИННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА АО «НАК КАЗАТОМПРОМ»

М. М. Искаков[1], С. К. Кайрамбаев[1], Ю. Г. Перменев[2], О. А. Агапов[2], С. А. Сайдуллаева[2], К. А. Жапабаев[2]

[1]АО «НАК «Казатомпром»
Нур-Султан, Казахстан, skairambayev@kazatomprom.kz
[2]ТОО «Институт высоких технологий»
Алматы, Казахстан, agaole@mail.ru

RADIOECOLOGICAL RESEARCH OF THE TERRITORIES ADJACENT TO UNDERGROUND URANIUM MINES

M. M. Iskakov[1], S. K. Kairambaev[1], Yu. G. Permenev[2], O. A. Agapov[2], S. A. Saidullaeva[2], K. A. Zhapabaev[2]

[1]NAC Kazatomprom JSC
Nur-Sultan, Kazakhstan, skairambayev@kazatomprom.kz
[2]LLT "Institute of High Technologies"
Almaty, Kazakhstan, agaole@mail.ru

The article presents the results of radioecological studies of the soil cover and surface and ground waters characterizing the radiological state of the territory of the region where uranium mining enterprises are located. The studies were carried out on the territory of the land allotments of the mines and within a radius of 10 km from them, to identify possible technogenic impacts; the background indicators of the state of environmental objects of the adjacent territories were also established.

АО «НАК Казатомпром» в 2019–2020 годах инициировало проведение комплексных экологических исследований воздействия на окружающую среду производственной деятельности уранодобывающих предприятий, расположенных в Кызылординской и Туркестанской областях. Одним из ключевых методов, который позволяет оценить влияние добычи природного урана, является радиоэкологическое исследование состояния окружающей среды непосредственно на территориях геотехнологических полигонов (ГТП) уранодобывающих предприятий, прилегающих и фоновых территориях. Объектами исследования являлись пробы почвенного покрова, поверхностных и подземных вод.

В соответствии с [1] в случае, если площадь предприятия составляет менее 100 км^2, зона максимально возможного воздействия на объекты окружающей среды (прилегающая территория) может распространяться на расстояние до 10 км от границ предприятия. Соответственно, фоновые (контрольные) территории, не испытывающие воздействие от производственной деятельности уранодобывающих предприятий и пригодные для сравнения, выбирали на расстоянии свыше 10 км от их границ. Для района расположения урановых рудников характерны сильные, почти беспрерывно дующие ветры, с преобладающим северным, северо-восточным и восточным направлениями со средней скоростью 2–3 м/с в течение всего года. В связи с этим, при выборе фоновых площадок учитывали также преобладающее направление ветров и тип почвы.

Обследование почв проводили площадным методом согласно [2], с отбором объединенных проб методом конверта с глубины 0–25 см. С ГТП каждого рудника отбирали в среднем 4–5 проб почвы, с прилегающих территорий, в зависимости от площади, от 10 до 42 проб почвы (в среднем 18), на фоновых территориях 2–3 пробы почвы. Были отобраны 61 проба почвы с ГТП двенадцати уранодобывающих рудников Туркестанской и Кызылординской областей, 223 пробы почвы с прилегающих территорий и 20 фоновых проб.

Проведено радиоэкологическое исследование поверхностных и подземных вод на прилегающих к уранодобывающим рудникам территориях. Обследованию подлежали реки, каналы, родники, колодцы и скважины на зимовках. Отобрано 42 пробы воды, в том числе 16 проб поверхностных и 26 подземных вод.

Содержание урана в воде определяли согласно [3], исследование суммарной удельной альфа- и бета-активности излучающих радионуклидов в почве и воде проводили по [4].

Результаты исследования почвенного покрова исследованных территорий в Кызылординской области представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Из представленных данных видно, что значения суммарной удельной альфа-активности в 40 % точек

обследования на прилегающей к урановым рудникам территории Кызылординской области соответствуют значениям естественного фона, измеренным за пределами зоны воздействия предприятий (значения суммарной удельной альфа-активности в пределах < 200–252 Бк/кг). В отдельных точках на прилегающей территории (24 % от общего числа исследований), по мере приближения к урановым месторождениям, значения суммарной удельной альфа-активности значительно выше фоновых.

Значения суммарной удельной бета-активности в 22 % проб ниже уровня фона, в 34 % проб соответствуют фоновым значениям, в 43 % проб превышают фоновый уровень.

Результаты исследования почвенного покрова исследованных территорий в Туркестанской области представлены в таблице 2 и на рисунке 2.

Из представленных данных видно, что уровни суммарной удельной альфа-активности в большинстве точек обследования (81 %) Туркестанской области соответствуют значениям естественного фона, измеренным за пределами зоны воздействия предприятий (значения суммарной удельной альфа-активности для проб в пределах < 200–560 Бк/кг). В отдельных точках на прилегающей территории (4 % от общего числа исследований), по мере приближения к урановым месторождениям, на расстоянии от 3–4 км и ближе, значения суммарной удельной альфа-активности значительно выше фоновых. Четкой закономерности распределения точек с повышенным значением суммарной удельной альфа-активности в почве не прослеживается.

Значения суммарной удельной бета-активности в 3 % проб ниже уровня фона, в 88 % проб соответствуют фоновым значениям, в 10 % проб превышают фоновый уровень.

Обследование почвы на территории ГТП урано-добывающих предприятий показало наличие точечного воздействия на почвенный покров. Уровни суммарной удельной альфа- и бета-активности почвы в отдельных точках значительно выше фоновых, до 15–20 раз по альфа-активности и в 7–9 раз по бета-активности.

Установлено, что для Туркестанской области средние значения суммарной удельной альфа- и бета-активностей почвенного покрова фоновых пло-

Таблица 1. Радиоэкологические исследования почвенного покрова в Кызылординской области

Место отбора проб	Количество отобранных проб	Количество проб с max значениями (выше средних)	Количество проб с min значениями (ниже средних)	Пределы значений, min–max, Бк/кг	Среднее значение, Бк/кг
суммарная удельная альфа-активность					
ГТП	14	9	5	625–4738	1892
Прилегающая территория	67	28	39	< 200–1159	390
Фон	5	2	3	< 200–272	224
суммарная удельная бета-активность					
ГТП	14	8	6	448–1599	844
Прилегающая территория	67	34	33	369–816	595
Фон	5	2	3	525–615	584

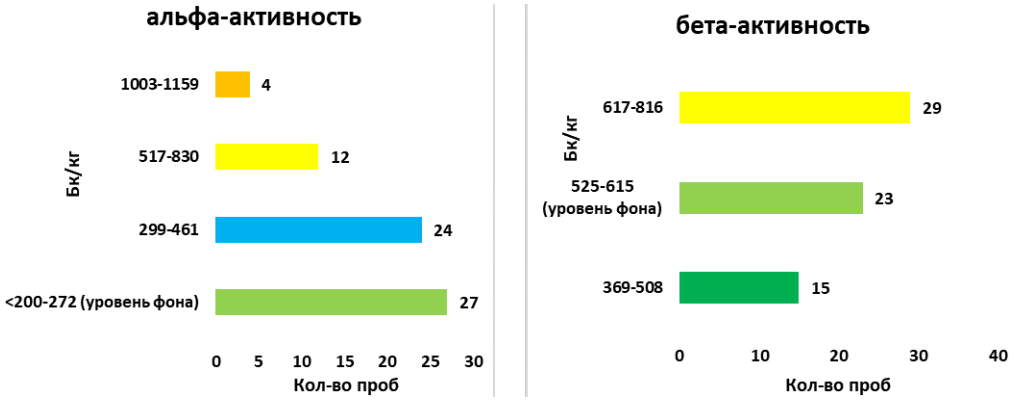


Рис. 1. Уровни суммарной удельной альфа- и бета-активности проб почвы с прилегающих к урановым рудникам территорий в Кызылординской области

Таблица 2. Радиоэкологические исследования почвенного покрова в Туркестанской области

Место отбора проб	Количество отобранных проб	Количество проб с max значениями (выше средних)	Количество проб с min значениями (ниже средних)	Пределы значений, min–max, Бк/кг	Среднее значение, Бк/кг
суммарная удельная альфа-активность					
ГТП	47	20	27	< 200–9317	2075
Прилегающая территория	156	63	93	< 200–1393	385
Фон	15	7	8	< 200–560	345
суммарная удельная бета-активность					
ГТП	47	19	28	398–2225	887
Прилегающая территория	156	73	83	398–1222	652
Фон	15	7	8	465–780	638

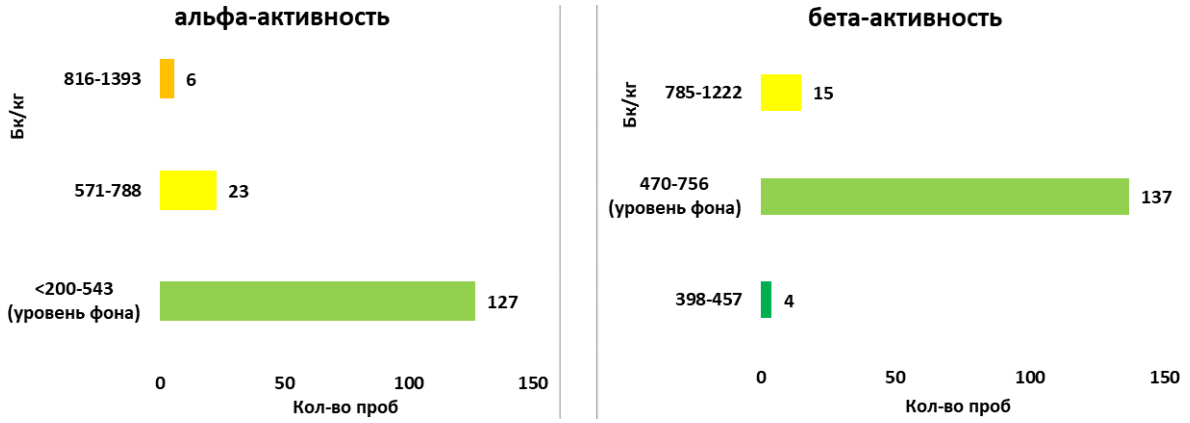


Рис. 2. Уровни суммарной удельной альфа- и бета-активности проб почвы с прилегающих к урановым рудникам территорий в Туркестанской области

Рис. 3. Показатели гамма-фона на январь 2021 года по областям Республики Казахстан, мкЗв/час

щадок выше аналогичных показателей для Кызылординской области на 54 % и 9,24 % соответственно. Средний уровень суммарной удельной альфа-активности почвы в Кызылординской области на прилегающих к уранодобывающим предприятиям территориях на 1,3 % выше, чем в Туркестанской области, в то же время значение суммарной удельной бета-активности ниже на 10 %. Эти данные подтверждаются материалами РГП «Казгидромет» [5]. Согласно проводимым замерам радиационного фона его уровень в Туркестанской области выше, чем в Кызылординской области (рисунок 3).

Значения суммарной удельной альфа- (0,16–1,0 Бк/дм^3) и бета- (0,03–0,4 Бк/дм^3) активности исследованных поверхностных водных объектов соответствуют фоновому уровню поверхностных вод для данных территорий, установленному в рамках исследований (0,017–1,033 Бк/дм^3 и 0,032–0,357 Бк/дм^3 для суммарной удельной альфа- и бета-активности соответственно). Содержание урана в поверхностных водах находится в пределах 35–137 мкг/дм^3, что также соответствует фоновым показателям.

Значения суммарной удельной альфа- и бета-активности подземных вод, отобранных из колодцев и скважин (с глубиной водозабора до 100 м), варьируют в пределах 0,08–0,3 Бк/дм^3 и 0,006–0,8 Бк/дм^3 соответственно. Содержание урана составляет 40–160 мкг/дм^3.

Таким образом, в результате проведенных работ по радиоэкологическому обследованию территорий, прилегающих к уранодобывающим рудникам в Кызылординской и Туркестанской областей, впервые установлены уровни суммарной удельной альфа- и бета-активности почвы на прилегающих и фоновых территориях.

Учитывая, что территории, прилегающие к уранодобывающим рудникам, располагаются в зоне месторождений урановых руд, где отмечается повышенный уровень естественного радиационного фона, повышенные уровни значений суммарной удельной альфа- и бета-активности проб почвы в отдельных точках вблизи рудников, по сравнению с территориями на удалении от границ месторождений, вполне естественны. Уранодобывающие предприятия не оказывают воздействия на объекты окружающей среды за пределами земельных отводов предприятий.

Уровни суммарной альфа- и бета-активности поверхностных и подземных природных вод и содержания урана на прилегающих территориях соответствуют фоновым значениям.

Негативное влияние деятельности по добыче урана на состояние почвенного покрова на территории земельных отводов предприятий было предусмотрено проектом оценки воздействия на окружающую среду при разработке месторождения. По завершении недропользования на этих территориях в обязательном порядке должна быть проведена рекультивация нарушенных земель.

Полученные данные будут использованы при разработке Проектов ликвидации последствий недропользования на уранодобывающих предприятиях, мероприятий по рекультивации нарушенных территорий и последующих мониторинговых работах.

Литература

1. Методические указания по проведению оценки воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду: утв. приказом МООС РК № 270-П от 29 октября 2010 года.
2. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб
3. СТ РК ИСО 17294-2-2006. Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). Часть 2. Определение 62 элементов.
4. МВИ № KZ.06.03.00023-2019. Методика (метод) измерений общей (суммарной) альфа- и бета-активности в пробах объектов окружающей среды и технологических сред (после их предварительной подготовки) с использованием низкофоновых альфа-бета-радиометров.
5. О состоянии окружающей среды РК // РГП «Казгидромет», январь 2021 г.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ РАДИЯ-226 И ЕГО ОБЛУЧЕНИЕ НЕЙТРОННЫМ ПОЛЕМ В РЕАКТОРЕ ТИПА ИРТ-Т С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИЯ-223

А. Б. Капитонов[1], Н. Р. Неволин[1], В. В. Сохорева[1], С. А. Пластун[1], А. М. Большаков[1], М. С. Черепнёв[1], М. С. Кузнецов[1], А. С. Семенов[2], В. М. Малютин[1], В. В. Зукау[1], Д. В. Кабанов[1], Ф. А. Ворошилов[1], Е. А. Маренкова[1], И. В. Безденежных[1]

[1]Томский политехнический университет
Томск, Россия, abk14@tpu.ru; nrn5@tpu.ru; sokhoreva@tpu.ru; kamikaze@tpu.ru; bolshakov@tpu.ru; maxcherepnev@tpu.ru; kms@tpu.ru;mvm@tpu.ru; zukau@tpu.ru; kabanovdv@tpu.ru; fvoroshilov@tpu.ru; eam33@tpu.ru; biv_spm@mail.ru
[2]АО «ТомскНИПИнефть»
Томск, Россия, semenovas@tpu.ru

ELECTROCHEMICAL DEPOSITION OF RADIUM-226 AND ITS IRRADIATION BY A NEUTRON FIELD IN A REACTOR OF THE IRT-T TYPE IN ORDER TO OBTAIN RADIUM-223

A. B. Kapitonov[1], N. R. Nevolin[1], V. V. Sokhorev[1], S. A. Plastun[1], A. M. Bolshakov[1], M. S. Cherepnev[1], M. S. Kuznetsov[1], A. S. Semenov[2], V. M. Malyutin[1], V. V. Zukau[1], D. V. Kabanov[1], F. A. Voroshilov[1], E. A. Marenkova[1], I. V. Bezdenezhnykh[1]

[1]TOMSKY Polytechnic University
Tomsk, Russia, abk14@tpu.ru; nrn5@tpu.ru; sokhoreva@tpu.ru; kamikaze@tpu.ru; bolshakov@tpu.ru; maxcherepnev@tpu.ru; kms@tpu.ru; mvm@tpu.ru; zukau@tpu.ru; kabanovdv@tpu.ru; fvoroshilov@tpu.ru; eam33@tpu.ru;biv_spm@mail.ru
[2]AO TomskNIPIneft
Tomsk, Russia, semenovas@tpu.ru

Radium-223 contributes to the death of bone metastases, which increases the chances of a patient with prostate cancer for remission and, as a result, prolonging a person's life, despite the course of the disease. Radium is able to linger in bones, namely in metastases. As a result of its action, it selectively acts on the tumor and destroys it. Also, radium-223 is able to have analgesic effects, which facilitates the course of the disease.

Введение

В настоящее время рак простаты занимает второе место среди онкологических заболеваний у мужчин в России. Примерно у 20 % людей, столкнувшихся с данной патологией, были обнаружены метастазы. Они снижают шанс пациента на выздоровление.

Радий-223 способствует гибели метастаз в костях, что повышает шансы больного раком простаты на ремиссию и, как следствие, продление жизни человека, несмотря на протекания заболевания. Радий способен задерживаться в костях, а именно в метастазах. В результате своего действия он селективно воздействует на опухоль и разрушает ее. Также радий-223 способен оказывать обезболивающие действие, что облегчает протекания болезни.

Основной плюс данного препарата по сравнению с аналогами является его низкая токсичность. Сразу после приема препарата человек не представляет опасности для окружающих, а после использования других препаратов пациент вынужден некоторое время находится в изоляции.

Материалы и методы

Для проведения эксперимента были взяты растворы бария, урана/тория и радия-226, с целью их осаждения на мишень электрохимическим способом. При прохождении постоянного электрического тока через вышеупомянутые растворы, целевое вещество осаждалось на катоде в виде мишени, которая в дальнейшем будет подвергнута нейтронному облучению. В результате нейтронной реакции получится основное действующие вещество препарата – радий-223.

Результаты и их обсуждение

После выделения электрохимическим методом бария, урана/тория как ближайших аналогов радия, был проведен эксперимент с самим радием-226, в результате которого на катоде, в виде мишени из нержавеющей стали был осажден радий-226, подтверждает данное суждение наличие радиоактивности после ее измерения на катоде.

Заключение

В результате исследований был разработан метод электрохимического осаждения радия-226 для дальнейшего получения концентрата радия-223.

Литература

1. Буткалюк П. С. и др. Получение экспериментальных образцов альфа-излучающих радионуклидов медицинского назначения // Сборник трудов АО ГНЦ НИИАР, 2018. – № 2. – С. 80–92.
2. Кузнецов Р. А. и др. Получение альфа-излучающих нуклидов облучением ^{226}Ra в высокопоточном реакторе см // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2014. – Т. 16. – № 6–1.
3. Пластун С. А. Установка для получения раствора радона в воде и органической жидкости / С. А. Пластун, Н. К. Рыжакова, М. С. Черепнев // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. Российский и международный опыт подготовки кадров: сборник тезисов докладов X Международной научно-практической конференции, г. Томск, 09–11 сентября 2020 г. — Томск: Ветер, 2020. — С. 127–128.

ПРИМЕНЕНИЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ЦЕЛЬЮ КАРТИРОВАНИЯ УРАНОНОСНЫХ ГИДРОТЕРМАЛИТОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ СТОЛБОВОЕ (ВОСТОЧНОЕ ПРИСАЯНЬЕ)

Е. Н. Карманов, Н. В. Леденева

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского» Москва, Россия karmanov@vims-geo.ru, ledeneva@vims-geo.ru

APPLICATION OF HYPERSPECTRAL STUDIES FOR MAPPING OF URANIUM HYDROTHERMALITES AT THE STOLBOVOYE FIELD (EASTERN PRISAYANYE)

E. N. Karmanov, N. V. Ledeneva

FSBI «All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N. M. Fedorovsky» Moscow, Russia karmanov@vims-geo.ru, ledeneva@vims-geo.ru

Detailed mapping of hydrothermal-metasomatic alterations and establishing their connection with ore mineralization allows to solve predictive and prospecting tasks. The main goal of these researches is to define a spatial, temporal, and genetic correlations between wallrock alterations and uranium mineralization.

Studies performed by Vis-NIR-SWIR spectroscopy on Stolbovoe deposit core samples revealed the composition of thin-mica-clay mineralization. Based on the results of the analysis of the obtained data were identified mineral parageneses, which made it possible to determine the spatial timing of distinct and genetic relations by composition metasomatites (mica and hydro-mica) with different magmatic complexes and uranium ore mineralization.

Введение

Участок проводимых работ расположен в северной части Восточного Саяна. Месторождение Столбовое локализовано в кристаллическом ядре Бирюсинской горст-антиклинали, являющейся внутренним поднятием фундамента Присаянского прогиба, в зоне Бирюсинского разлома. В строении месторождения выделяется два структурных этажа – нижнепротерозойский гранито-гнейсовый фундамент и, перекрывающий его, субплатформенный осадочный средне-верхнерифейский чехол. В строении площади принимают участие силлы нерсинского комплекса, залегающие среди песчаников среднего рифея, и более ранние дайки ангаульского комплекса, предположительно раннерифейского возраста, не прорывающими отложения чехла.

Становление гранито-гнейсов саянского комплекса завершилось формированием кремне-калиевых метасоматитов со шлировыми выделениями, обогащенными биотитом и акцессорными ториевыми, редкоземельными, урансодержащими и урановыми минералами: цирконом, монацитом, Th-монацитом, торитом, фергусонитом, уранинитом.

Гидротермальное урановое оруденение, представленное настураном и коффинитом, локализовано в измененных гнейсо-гранитах и в тектонически

нарушенных дайковых телах долеритов и приурочено к линейным крутопадающим прожилково-метасоматическим зонам.

Работами, проводившимися нами ранее и в настоящее время, установлено, что околорудные изменения на месторождении представлены березитоподобными тонкослюдисто-глинистыми образованиями, образующими во вмещающих биотитовых гранито-гнейсах и гранитоидах неоднородные ореолы.

Светлые тонкие слюды, во вмещающих породах характеризуются избирательным псевдоморфным развитием. Они с разной степенью интенсивности развиваются по плагиоклазовой составляющей вмещающих пород. Тонкочешуйчатые агрегаты слюды, заместившие зерна плагиоклаза на 10–20 % придают породам светлый зеленовато-желтый оттенок. Плотные крипточешуйчатые агрегаты слюды, полностью замещающие зерна плагиоклаза, придают им визуально темную оливково-зеленую окраску. Поэтому распределение приобретенной окраски в измененной породе всегда мелко- или гнездово-пятнистое, обусловленное количеством и распределением в породе исходного плагиоклаза.

Слюдистые изменения развиваются вдоль прожилков, выполненных тонко-криптозернистым халцедоновидным кварцем, часть из которых обогащена скоплениями сульфидов и содержит урановорудную минерализацию. Ореол изменений вдоль прожилка имеет симметричное и обычно зональное строение, обусловленное, прежде всего, разной интенсивностью метасоматоза, что отчетливо визуализируется по изменению окраски вмещающей породы и метасоматических зон внутри ореола. Во фронтальной (внешней) и промежуточной зонах метасоматического ореола светлые тонкие слюды придают изначально серо-розовым породам зеленоватый – светло-оливковый цвет или оттенок. В тыловой (внутренней) зоне тонкослюдистые изменения за счет интенсивного развития преобразуют породу в густой оливковый цвет (до темно-зеленого).

Материалы и методы

В период с 2018 по 2020 гг. в рамках поисковых работ на Шангулежской площади, в пределах которой находится месторождение, проводилось детальное исследование гидротермально-метасоматических изменений и их связи с рудной урановой минерализацией. Помимо традиционных методов изучения вещества (визуальное картирование, минералого-петрографические и геохимические исследования) была проведена диагностика (Рассулов В. А.) минерализации с использованием портативного спектрометра TerraSpec 4 Hi-Res (ASD Inc. Panalytical NIR Center, США), функционирующего в видимой, ближней и коротковолновой ИК области спектра (Vis-Nir-Swir).

Исследования проводилось в несколько этапов. На первом этапе с использованием гиперспектрометра проводились измерения в керне скважин с шагом от 10 см до нескольких метров в зависимости от степени изменения пород. В последующем полученные данные обрабатывались с помощью программного обеспечения TSGVersion 7 (CSIRO, Australia). В завершение исследования проводилась интерпретация результатов и их сравнение с данными, полученными при изучении вещества традиционными методами.

В ходе проводимых исследований была показана и подтверждена высокая точность определения всех разновидностей глинистых, тонкослюдистых минералов, карбонатов и хлоритов в породе *in situ* и образцах без предварительной пробоподготовки.

Применение этого метода является особенно эффективным при поисках скрытых и слабо проявленных месторождений, на которых широкие ореолы гидротермально-метасоматических изменений могут не выходить на дневную поверхность.

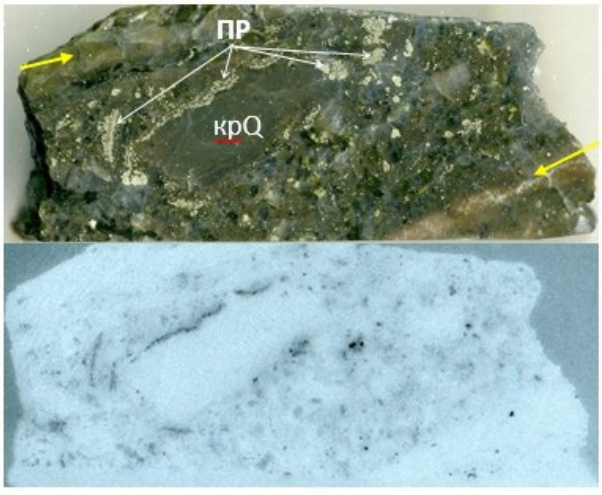


Рис. 1. Оруденелая сложная брекчия слюдисто-пирит-кварцевого состава

Обломки представлены измененным гранитом и его компонентами – кварцем, серицитизированным плагиоклазом, а также метасоматическими составляющими – халцедоновидным криптокварцем серого/темно-серого цвета (кр/Q). Цемент слюдисто-кварцевый с пиритом (ПР). Урановый минерал образует вкрапленность и микровыделения, отчетливо тяготеющие к скоплениям пирита. Желтыми стрелками показаны пострудные прожилки кварца и их направление. Обр. 2/174,5 с радиографией 14 суток. Натуральн. величина.

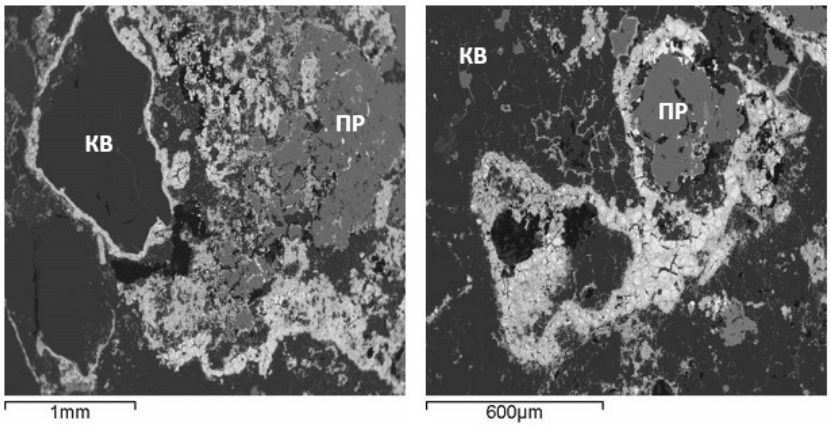


Рис. 2. Скопление тонких, разнообразных по морфологии и составу, выделений урановой минерализации (все оттенки светло-серого до белого за счет переменного содержания урана) на оруденелом участке размером 2–3 мм в пиритизированном (ПР) слюдисто-криптокварцевом метасоматите. Обр. 1/118,7. Фото в отраженных электронах, РСМА

Результаты и их обсуждение

Картирование состава минеральных фаз гиперспектральным анализом, проведенное в полевых условиях по керну скважин и в отобранных образцах, позволило выявить некоторые закономерности их развития во вмещающих породах, предпочтительные условия локализации и наиболее часто встречающиеся парагенезисы.

Картирование ИК-гиперспектрометром показало, что крутопадающие рудоносные структуры, трассируемые дайками раннерифейского возраста, сопровождаются тонкослюдистой березитовой ассоциацией основными минералами которой являются фенгит-серицит-Fe-хлорит-доломит-сидерит.

Фенгит и серицит образуют тесную пространственно-временную ассоциацию. Оба минерала характерны для всего ореола метасоматических изменений и развиты наиболее широко. Количества серицита и фенгита относительно друг друга часто колеблются в широких пределах, так как их образование по-видимому зависит от состава вмещающих пород (их лейкократовости/меланократовости соответственно).

Совместно с ними нередко находятся мелкокристаллические карбонаты – сидерит, реже доломит, а также микророзетковый Fe-хлорит, который встречается, как правило, вблизи долеритовых даек.

С метасоматитами березитового состава связана урановорудная минерализация представлена настураном (Рис. 1, 2), который локализован в криптокварцевых прожилках, обогащенных пиритом. Настуран образует колломорфные выделения в зальбандах прожилков, вокруг обломков микробрекчий и тонкую вкрапленность в криптокварце.

Прожилково-рудные зоны широко проявленные в гранито-гнейсовой среде встречаются также в эндоконтактах крутопадающих даек долеритов. Изотопная система настурана была проанализирована аккредитованным U–Pb методом в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии «ИГЕМ» РАН (аналитик Голубев В. Н.). Полученное значение составило 1313 ± 23 млн. лет. Возраст оруденения наиболее

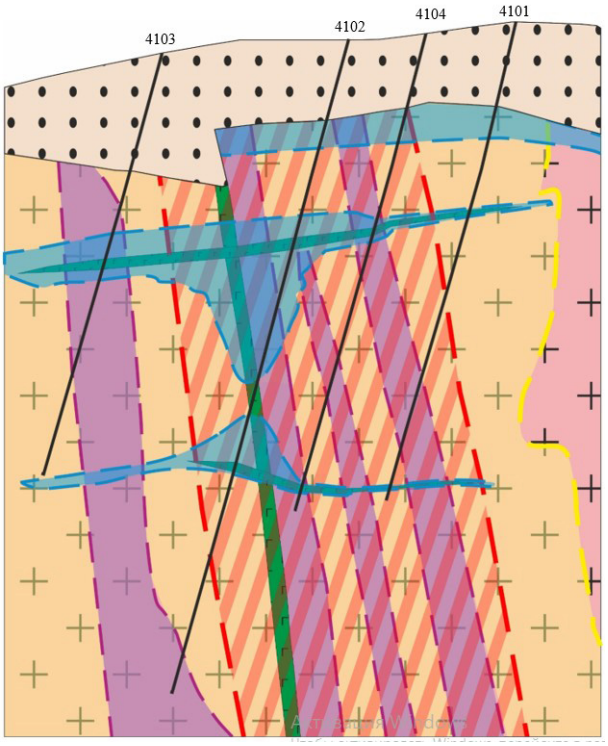
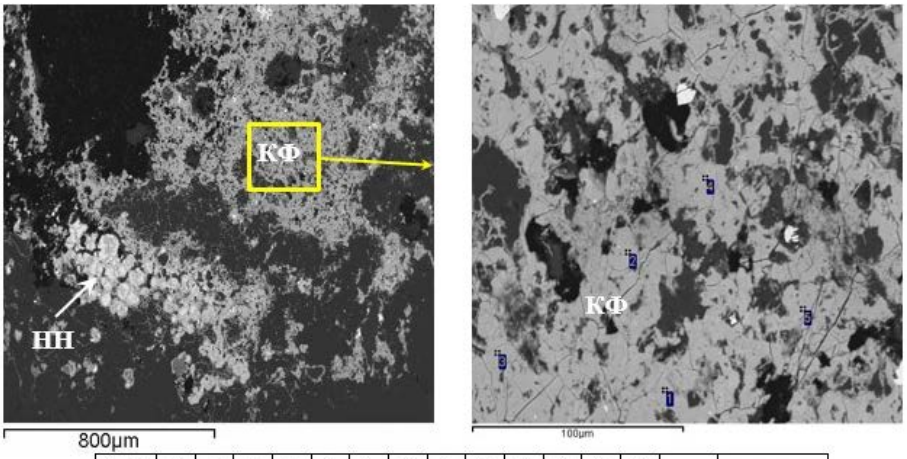


Рис. 3. Геологический разрез по ПЛ 76 с элементами гидротермально-метасоматической зональности, установленной методом UV-Vis-SWIR-гиперспектрометрии

Условными обозначениями показаны изменения I этапа: 1 – преимущественно фенгит-доломит-Fe-хлоритовые изменения, 2 – преимущественно серицит-сидеритовые изменения; изменения II этапа : 3 – иллит-смектит-Fe-карбонат-Mg-хлоритовые изменения.



Spectr	Si	P	Ca	Ti	Fe	Sr	Y	Sb	Ce	W	Pb	U	O	сумма	минерал
1	8,09	0,24	1,32	0,09	0	1,8	2,17	0,49	0,56	0,84	0	51,2	19,6	88,13	коффинит
2	7,88	0	1,66	0,22	0,21	1,09	2,22	0,2	0,76	0,31	0	50	18,9	85,69	коффинит
3	7,99	0	1,13	0,09	0,56	0,58	1,8	0,23	0,61	0,49	0,36	51	20,4	87,83	коффинит
4	9,68	0	1,33	0,15	2,51	0,79	1,78	0,46	0,64	0,88	0	38,1	21,8	83,77	коффинит
5	7,6	0,12	1,5	0,32	0	2,73	1,48	0,58	0,75	0,68	0	52,2	19,3	90,07	коффинит

Рис. 4. Скопления коффинита (КФ) различной размерности имеют «рыхлое» строение, нередко ажурный облик, отличный от плотных почковидно-коломорфных выделений настурана (НН). Обр. 1/118,7. Фото в отраженных электронах, РСМА

близок к возрасту даек долеритов ангаульского комплекса, соответствующих раннерифейскому тектономагматическому циклу.

Анкерит/кальцит – Mg-хлорит – смектит – иллитовая ассоциация

Зоны гидротермально-метасоматических изменений, сформировавшиеся на втором, средне-позднепротерозойском этапе, образуют самостоятельные ореолы, большей частью сопровождающие пологопадающие долеритовые дайки и силлы. Эти структуры сопровождаются более низкотемпературными гидрослюдистыми (иллитовыми) изменениями.

Гидрослюдистая составляющая метасоматитов включает – фенгит-иллит, мусковит-иллит, парагонит-иллит, совместно с которыми нередко находится монтмориллонит, Fe–Mg-, Mg-хлорит, анкерит, иногда кальцит.

Изменения этого этапа проявлены в пространстве более локально, образуя компактные маломощные зоны на фоне развития березитовых изменений.

Для метасоматитов второго этапа характерно присутствие не только калиевой, но и натриевой минерализации (парагонит-иллит). Что вероятно указывает на более щелочную натриевую и магниевую специализацию базитового магматизма второго этапа ТМА.

В случаях телескопированного наложения данной ассоциации на рудные зоны с оксидом урана (Рис. 3), приводит к образованию переотложенного коффинита (Рис. 4) с возрастом, соответствующим средне-позднерифейской активизации.

В тех случаях когда гидрослюдистые метасоматиты имеют самостоятельное развитие и не наследуют урановорудные зоны I этапа, они безрудны. Это свидетельствует о том, что гидротермально-метасоматические образования второго этапа не являются рудогенерирующими, а способствуют лишь частичному переотложению оксидноурановой минерализации с образованием коффинита. Силикат урана как правило сопровождается небольшими количествами полиметаллической сульфидной минерализации – марказитом, галенитом, сфалеритом, халькопиритом и арсенопиритом, а также флюоритом.

Характерно, что диагностика глинисто-слюдистой минерализации возможна только лишь с применением прецизионных методов, из которых наиболее полезен своей оперативностью диагностический метод с использованием гиперспектрометра. По внешним признакам, макро- и микроскопически, тонкослюдистая минерализация не диагностируется. Поэтому только с применением гиперспектрометра появилась возможность отстроить околорудные ореолы не только по интенсивности метасоматоза, но и по минеральному составу и выявить вещественные различия.

Внутреннее строение околорудных ореолов довольно сложное. Изменение состава тонких слюд и иллитов, их пространственное распространение и взаимоотношение требуют дополнительного анализа и изучения. Более детальное изучение распределения метасоматитов позволяет точнее оконтуривать зоны разнотемпературных изменений и находить закономерности с основными этапами рудообразования.

ЗОНАЛЬНОСТЬ, СТАДИЙНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ УРАНОНОСНЫХ БЕРЕЗИТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО КАРТИРОВАНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ НА МЕСТОРОЖДЕНИЕ УРАНА (НА ПРИМЕРЕ ЮЖНОГО КАЗАХСТАНА)

С. В. Кашин

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ФГБУ «ВСЕГЕИ»)
Россия, sergey_kashin@vsegei.ru

ZONING, STAGES AND FEATURES OF FORMATION OF URANIFEROUS BERESITES RESULTING FROM A SPECIAL-PURPOSE MAPPING OF HYDROTHERMAL-METASOMATIC ALTERATION ON URANIUM DEPOSITS (ON THE EXAMPLE OF SOUTH KAZAKHSTAN)

S. V. Kashin

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI)
St. Petersburg, Russia. Sergey_Kashin@vsegei

Uranium deposits have distinct composition of ores, but exhibit approximate composition and zoning of hydrothermal-metasomatic alteration. Uranium and molybdenum are located in distinct parts of beresites. During the wall-rock beresitization the process of uranium precipitation from the hydrothermal solution took place not in the restricted volume where the ore body is now. The ore-forming process was going on within the whole volume of the wall-rock beresites. Then ore material relocated into the local volume and formed the ore body.

Введение

Район исследований располагается в Чу-Илийских горах Казахстанской складчатой области. В районе получили широкое развитие эпиконтинентальные образования девонского вулкано-плутонического пояса, которые послужили рудовмещающими породами для урановорудных объектов.

В пределах восточной части Кызылсай-Ботабурумского урановорудного района, которая пространственно совпадающего с позднедевонским Джусандалинским гранитным массивом, было проведено специальное петрографо-геохимическое картирование гидротермально-метасоматических образований [5, 6]. Помимо изучения регионально проявленных метасоматитов были проведены детальные исследования околорудных метасоматитов на трёх урановорудных объектах: рудопроявлении Шенгельды и месторождениях Джусаналинское и Ботаборум.

Материалы и методы

Для выявления характера связи гидротермального уранового оруденения и гидротермально-метасоматических образований был использован метод картирования последних. Было проведено специальное опробование и составлена карта гидротермально-метасоматических образований масштаба 1 : 50 000 на площадь 1 300 кв. км. Для изучения околорудных метасоматитов были выбраны три рудных объекта: месторождения Джусандалинское (уран) и Ботаборум (уран, молибден) и уран-фосфорное проявление Шенгельды, по которым составлены детальные метасоматические и геохимические разрезы масштаба от 1 : 100 до 1 : 10 000.. На проявлении Шенгельды изучены и опробованы 6 скважин глубиной от 200 до 450 метров, отобрано 150 образцов. На Джусандалинском месторождении опробованы 16 скважин глубиной от 600 до 1100 метров и шахта, отобрано более 900 образцов. На месторождении Ботаборум опробована шахта (7, 9, 11, 13, 15 горизонты) и 12 скважин глубиной от 100 до 600 метров, отобрано более 600 образцов. Составлен метасоматический разрез, соединяющий месторождения Ботаборум и Джусандалинское длиной 22 км. Для этого изучены шлифы по 64 глубоким (от 200 до 1100 метров) скважинам, всего около 1 400 из коллекции Киргизского ГРК.

Всего по данному району изучено более 6500 шлифов и 40 аншлифов. Были проведены аналитические работы в объёме:

- 6500 спектральных и рентгеноспектральных анализов;
- 2000 рентгеноспектральных изотопно-свинцовых анализов;
- 4000 химико-спектральных, атомно-абсрбционных и пробирных определений золота;

• 1050 определений физических свойств горных пород (пористость, плотность, магнитная восприимчивость);

• 1500 определений фтора методом количественного спектрального анализа;

• 700 определений ртути методом атомной абсорбции;

• 300 силикатных рентгеноспектральных анализов;

• 20 определений абсолютного возраста K-Ar методом;

• 2 определения изотопного состава серы пиритов;

• 36 рентгеноструктурных анализов минералов;

• 46 определений химического состава минералов на микроанализаторе «Comebax»,

• 146 определений концентрации радиационных дефектов (EI – центров) в кварце методом электронного парамагнитного резонанса;

84 – определения распределения урана в шлифах методом изучения треков осколков индуцированного деления.

Результаты и их обсуждение

В пределах гранитного массива и его обрамления установлены две региональных гидротермально-метасоматических формации (ГМФ): более ранняя плутоногенная фельдшпатолитовая и более поздняя тектоногенная пропилит-березитовая [4, 5].

Формирование метасоматитов плутоногенной фельдшпатолитовой ГМФ обусловлено постинтрузивным автометасоматозом, они являются более ранними по отношению к урановому оруденению. Они обладают хорошо изученной зональностью и стадийностью формирования [1, 4], включающей развитие (от более ранних к более поздним) следующе разновидности метасоматических образований: ранние высокотемпературные калишпатолиты → высокотемпературные альбитолиты → грейзены → поздние альбититы → поздние калишпатиты. За исключением поздних альбититов метасоматиты данной формации имеют площадное распространение и не высокую степень проявленности (5–30 %). Поздние альбиты частично являются рудовмещающими породами на рудопроявлении Шенгельды и месторождении Джусандалинское. Эти породы представляют собой интенсивно альбитизированные (на 70–90 %) лейкограниты, кварц полностью выщелочен, на его месте образовались пустоты, пористость возросла до 10 %, содержание SiO_2 упало до 60–62 % (при пористости 0,8–1,5 % и содержании SiO_2 72–75 % в слабоизменённых гранитах). Содержание Na_2O возрастает до 10 %, K_2O падает до 1,0 %. Для них характерны повышенные содержания U, Zr, Nb, Al_2O_3 и пониженные Rb, Pb, P. Магнитная восприимчивость нулевая. Они слагают тела линзовидной формы мощностью первые метры, имеют резкие контакты и располагаются в местах выклинивая зон грезенизации. Сходные породы встречены на урановых месторождениях французского срединного массива [7], где, так же, как и в Кызылсай-Ботабурумском урановорудном районе, являются отчётливо дорудными.

Тектоногенная пропилит-березитовая ГМФ является рудоформирующей для уранового оруденения. Ареалы её проявления имеют узловой характер и контролируются разрывной тектоникой. Они являются результатом функционирования тектоногенных (амагматических) приразломных гидротермально-метасоматических систем. Площади ореолов составляет десятки – первые сотни км^2, они обладают зональным строением. Периферические зоны сложены пропилитами, центральные – березитами. Центральные зоны со значительным перекрытием накладываются на периферические.

Пропилиты состоят из хлорита и кальцита, количество их в породах варьирует от 3–5 до 25–40 %, увеличиваясь от внешних к внутренним частям ореолов и достигая максимума на границе с березитами (пропилит-березитовый барьер). Урановое оруденение локализовано на пропилит-березитовом барьере в полнопроявленных околорудных березитах. Березиты площадного распространения состоят из серицита, кварца и анкерита, содержание которых 3–10 %. Аргиллизиты представляют собой надрудные части березитов, они сформировались после того, как образовались березиты и руды из «отработанных» кислых растворов. Они имеют кварц-каолинит-гидрослюдистый состав, количество новообразованных минералов не превышает 3–5 %.

Среднее Джусандалинское месторождение располагается в восточном эндоконтакте одноименного гранитного массива в 10 км к юго-востоку от месторождения Ботаборум. Участок месторождения сложен среднезернистыми лейкогранитами и мелкозернистыми порфировидными гранитами. Околорудные березиты на Джусандалинском месторождении состоят из двух последовательно образовавшихся минеральных ассоциаций. Ранняя – кварц-серицит-пиритовая, имеет маломощную внутреннюю зону и не контролирует в масштабах месторождения рудную минерализацию. Поздняя – анкерит-гидрослюдистая ассоциация отчетливо контролирует урановое оруденение и при приближении к руде последовательно увеличивается до 50–70 % и более [2]. Руды представляют собой сургучно-красные граниты, часто катаклазированные, с пустотами выщелачивания кварца (эписиениты), настуран образует межзерновые плёнки, заполняет пустоты, цемент брекчий. Минералы березитов в рудах фактически отсутствуют. В рудах и непосредственно в околорудном пространстве появляется признаки эйситизации (доломит, фтор-апатит, альбит, гематит) и более поздний сидерит. Среднее содержание урана 0,24 %.

В нескольких метрах от рудного тела метасоматические минералы березитов резко выклиниваются и практически исчезают, и рудное тело окружено фактически околорудной неизмененной зоной. В этой своеобразной околорудной неизмененной зоне присутствует только тонкодисперсный гематит, содержание которого быстро увеличивается при приближении к руде и в 0,5–2 метрах тонкодисперсная гематитизация наблюдается визуально (околорудное покраснение). В целом слабопроявленная тонкодисперсная гематитизация наблюдается в шлифах на расстоянии в сотни метров от рудного тела и совпадает с ореолом околорудных березитов, являясь его неотъемлемой частью.

Изучение поведения урана в процессе развития рудоносной пропилит-березитовой ГМФ изучено на большом статистическом материале (около 3 тысяч проб) в однородных вмещающих породах (лейкократовых гранитах). Уран выносился из зон пропилитизиции и привносился в зону березитизации. В геохимическом отношении околорудные березиты представляет собой область резко контрастного, неоднородного распределения урана, в которой локальные зоны выноса тесно сопряжены с контрастными положительными аномалиями. Локальные зоны выноса связаны с реликтами пропилитов и монокварцевыми ядрами ранней кислотной стадии березитизации.

Изучение поведения урана в околорудных березитах показало, что уран ведет себя инертно в процессе образования минеральных ассоциаций березитов. В процессе образования минералов кислотной стадии (ранняя – кварц-серицит-пиритовая ассоциация), наблюдается даже некоторый вынос урана. Количество минералов поздней – анкерит-гидрослюдистой ассоциации также не оказало влияние на содержание урана в породе.

Все без исключения аномальные содержания урана в ореоле березитов связаны только с теми участками, где присутствует тонкодисперсный гематит, что подтверждается изучением распределения урана с помощью треков индуцированного деления урана.

Поведение урана и его рудоотложение в ходе развития сопряженной пропилит-березитовой метасоматический системы можно представить следующим образом:

• уран переносится в слабощелочных растворах в шестивалентной форме в виде уранил-карбонатых комплексов. Поведение урана в зоне выноса и транзита (хлорит-кальцитовых пропилитах) определялось режимом углекислоты [3];

• разрушение уранил-карбонатных комплексов происходило после завершения стадии кислотного метасоматоза на стадии образования анкерит-гидрослюдистой ассоциации. Их распад происходил не только в том ограниченно пространстве, где сейчас находится рудное тела, а во всем объеме анкеритизации. Восстановление урана из шести- в четырехвалентное состояние происходило за счет окисления железа из двух- в трехвалентное состояние;

• после завершения одноактного процесса окисления-восстановления гидротермальный раствор расщепился на две несмешивающиеся жидкости: силикатно-карбонатную и рудную гематит-настурановую;

• рудная составляющая в условиях эллизионного режима стянулась в рудную «каплю» в локальный объем в ослабленной, проницаемой зоне, образовав рудное тело.

Спорадически встречающаяся во всем объеме околорудных березитов тонодисперсная гематитизация и обогащенная тонкодисперсным гематититом околорудная неизмененная зона являются фрагментами, реликтами урановорудного процесса, который состоял из распада уранил-карбонатных комплексов и восстановление урана железом. Этот процесс происходил во всем объеме околорудных березитов с последующим перемещением (стяжением) рассеянной тонкодисперсной рудной составляющей в локальный объем, что привело к формированию рудного тела.

Весь ореол околорудных березитов насыщен трещинным магнезиально-железистым хлоритом и редкими кальцит-кварцевыми прожилками. Магнезиально-железистый хлорит слагает зоны объёмного катаклаза, по-видимому образовавшиеся после завершения рудообразования.

Рудопроявление Шенгельды расположено в западном эндоконтакте Джусандалинского гранитного массива, на контакте лейкогранитов и гранодиоритов. Околорудные березиты, локализованные на пропилит-березитовом барьере, имеют строение, состав и зональность вплоть до деталей, аналогичную березитам Джусандалинского месторождения. Руды проявления представляют собой интенсивно брекчированные и гематитизированные граниты и эписиениты, цемент брекчий сложен агрегатом доломита, апатита, хлорита, альбита, гематита. В составе руды преобладает настуран, коффинит встречается реже. По составу руды сходны с рудами Джусандалинского месторождения, но отличаются существенно более высоким содержанием фосфора (P_2O_5 до 12,0 %) и натрия (Na_2O до 9,1 %). Высокие содержания фосфора и натрия отмечаются также в околорудном пространстве, где широко развиты альбит и апатит, то есть внутреннюю, непосредственно примыкающую к руде зону березитов слагаю эйситы. Следует подчеркнуть, что альбит эйситов резко отличается по морфологическим признакам, составу и положению в последовательности образования минералов от альбита эписиенитов и располагается от последнего структурно независимо.

Крупное молибден-урановое месторождение Ботаборум размещается в северном экозонтакте

Джусандилинского гранитного массива, в Сартыумской зоне разломов и локализовано в верхнедевонском вулканическом некке размером 6,5 × 8 км, сложенном преимущественно флюидальными риолитами и эксплозивными брекчиями риолитов. В пределах рудного поля также установлены гидротермально-метасоматические образования двух ГМФ: дорудной плутоногенной фельдшпатолитовой и более поздней тектоногенной ураноносной пропилит-березитовой. К метасоматитам фельшпатолитовой ГМФ относятся альбит-кварцевые роговики, эпидотовые пропилиты и грейзены.

Последовательность образования минеральных ассоциаций и зональность березитов на Ботаборуме в целом аналогична березитам Джусандалинсого и Шенгельдов. Околорудные березиты на Ботаборуме также состоят из двух последовательно образовавшихся минеральных ассоциаций: ранней – кварц-серицит-пиритовой и поздней – анкерит-гидрослюдистой. Но метасоматиты ранней кварц-серицит-пиритовой ассоциации развиты на месторождении очень широко, гораздо шире, чем на Джусандалинском. Кроме того, в вещественном составе руд месторождений Джусандалинское и Ботабурум имеется существенное различие. В отличии от Джусандалинского на Ботабуруме в составе руд имеются процентные содержания молибдена. Детальное изучение околорудных метасоматитов показало, уран-молибденовые руды, в которых оба элемента находились бы примерно в равных количествах, практически отсутствуют и на месторождении можно выделить два типа руд: молибденовые (с ураном) и урановые (с молибденом) (Таблица 1).

Молибденовые с ураном руды сопровождаются околорудным потемнением (мельчайшей вкрапленностью пирита и арсенопирита), локализованы по периферии моноквацевых ядер, образовавшихся в раннюю, кварц-пирит-серицитовую (кислотную) стадию. Оруденение локализовано в местах перехода кварцевого ядра в серицитолит с обильной вкрапленностью пирита. Урановые с молибденом руды (как и на Джусандалинском) месторождении контролируются ореолами развития анкерита и гидрослюды и окружены околорудной тонкодисперсной гематитизацией и прожилковым трещинным хлоритом. В урановых с молибденом рудах увеличиваются содержания Na_2O, Fe_2O_3, P_2O_5, что даёт основание говорить о наличии здесь геохимических признаков эйситизации.

Таблица 1. Петрохимический состав руд месторождения Ботаборум (по материалам И. С. Модникова, К. Б. Скворцовой, ВИМС)

Элементы	Урановые с молибденом руды (среднее из 10 анализов) в %	Молибденовые с ураном руды (среднее из 12 анализов) в %
U	2,36	0,12
Mo	0,1	1,1
SiO_2	69,26	76,29
TiO_2	0,23	0,07
Al_2O_3	13,51	16,22
Fe_2O_3	1,71	0,81
FeO	0,97	1,61
MgO	0,54	0,13
CaO	0,52	0,69
Na_2O	0,85	0,37
K_2O	4,76	3,96
S	0,11	1,56
P_2O_5	0,11	0,05

Положение в региональной метасоматической зональности, детали строения околорудных метасоматитов, представленных березитами с признаками эйситизации, дают основания для отнесения Джусандалинского уранового месторождения, молибден-уранового месторождения Ботаборум и фосфор-уранового проявления Шенгельды к единой ураноносной ГМФ, которая возникла на завершающей стадии активноокраинного этапа развития территории после завершения гранитоидного магматизма. Молибденовые с ураном и урановые с молибденом руды на Ботаборуме приурочены к различным частям метасоматической колонки околорудных березитов и можно предположить разные механизмы выпадения из растворов молибдена и урана в ходе развития единого процесса образования околорудных березитов.

Литература

1. Беус А. А., Северов Э. А., Ситнин А. А., Субботин К. Д. / Альбитизированные и грейзенизированные граниты (апограниты). – М.: АН СССР, 1962. – 195 с
2. Кашин С. В. Околорудные березиты Джусандалинского месторождения и поведение урана в ходе их развития // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. – М., 2017. – Вып. 160. – С. 145–154.
3. Наумов Г. Б. Основы физико-химической модели уранового рудообразования. – М.: Атомиздат, 1978. – 212 с.
4. Плющев Е. В., Шатов В. В., Кашин С. В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. – 560 с. – Труды ВСЕГЕИ, Новая серия. – Т. 354.

5. Плющев Е. В., Ушаков О. П., Шатов В. В., Беляев Г. М. Методика изучения гидротермально – метасоматических образований. – Л.: Недра, 1981. – 262 с.
6. Плющев Е. В., Шатов В. В., Беляев Г. М. Методические рекомендации по геолого-геохимическому изучению гидротермально-метасоматических образований при ГРС-50 с общими поисками. – СПб.: 1992. – 64 с.
7. Jurain G., Renard I. P. Geochimic de l´uraniam dans les mineraux phylliteux et les rockes du massif granitique de Montagne-sur-Seivre, (Vendee) France // Miner. Deposita, 1970. – № 4. – P. 354–364.

УРАН И ТОРИЙ В ЛАМПРОФИРАХ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ СКЛАДЧАСТОЙ ОБЛАСТИ

Б. К. Кенесбаев

Томский политехнический университет
Томск, Россия, bkk2@tpu.ru

URANIUM AND THORIUM IN LAMPROPHYRES OF THE ALTAI-SAYAN FOLDED REGION

B. K. Kenesbayev

Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, bkk2@tpu.ru

The work is devoted to the study of lamprophyres of the Altai-Sayan region. According to X-ray phase analysis, these rocks have a complex mineral composition. According to the TAS diagram, the petrochemical composition varies from alkaline picrites to trachytes. As the INAA shows, the studied samples are significantly enriched with thorium and uranium. Combining the method of electron microscopy and fission radiography (f-radiography), the occurrence forms of thorium and uranium were studied, therefore concentrating minerals were identified.

Введение

Термин «лампрофир» (в переводе с греческого *lampros* = блестящий) был предложен Гумбелем в 1874 г, чтобы охарактеризовать некоторые слюдяные дайки в северо-восточной Баварии. Лампрофиры представляют собой сложную группу пород, которые имеют минералогическое сходство с некоторыми кимберлитами и лампроитами [11].

В классификации изверженных пород МСГН (Международный союз геологических наук) лампрофиры представляют собой особую группу пород, которая химически не может быть отделена от других магматических пород. Это сильно порфировые, с полевыми шпатами и/или фельдшпатойдами, при наличии, приуроченными к основной массе, с биотитом/флогопитом и/или амфиболом и иногда клинопироксеном в качестве основных минералов. Они обычно встречаются в виде даек или небольших интрузий и часто демонстрируют признаки гидротермальных изменений [9].

Работа строится на районах исследования: Горный Алтай – это лампрофиры Акташского, Юстыдского и Тархатинского ареалов, так называемый чуйский комплекс, а также Южно-Минусинская впадина, представленная Ербинским некком. Лампрофиры Горного Алтая были изучены и описаны Л. А. Михалевой, Р. В. Оболенской, С. В. Мельгуновым, А. Д. Ножкиным, А. С. Митропольским, В. П. Ковалевым, В. И. Крупчатниковым, Е. А. Васюковой и др. Они представлены минеттами, камптонитами, вогезитами, мончикитами и керсантитами. Последние менее распространены, но, как правило, пространственно они разобщены [1, 3, 4, 8].

Ербинский некк анкаратритов расположен в 2 км южнее станции Ербинской на левом склоне долины реки Бюря и образует небольшую высотку среди вмещающих гранодиоритов Уйбатского плутона. В плане тело имеет овалообразную форму сечением 190 × 320 м; юго-западный контакт падает под углом 35–50° к центру некка [7].

Материалы и методы

В 2018 г. были проведены полевые работы в Горном Алтае и Кузнецком Алатау, где автором отобран каменный материал, произведена гамма-спектрометрическая съемка при помощи прибора GS-512. В 2019 году состоялись дополнительные полевые работы в составе АО «Горно-Алтайская экспедиция». Также отобран каменный материал, произведена гаммаспектрометрическая съемка прибором GS-512. Автором были посещены Тархатинский массив, Жанъедыгуйский ареал, ареал реки Усай и Ер-

бинский некк, отобрано 15 образцов. Кроме того, в работе по Горному Алтаю используется каменный (13 шт) и порошковый (9 шт) материал, полученный от Васюковой Е.А., также 3 каменных образца с Юга Кош-Агачского района получено от В. И. Крупчатникова. По Ербинскому некку от Л. П. Рихванова было получено 7 каменных и 3 порошковых образца. Таким образом в работе было задействовано 50 образцов. Из всех образцов было получено и изучено 125 проб. На базе образовательного центра «Урановая геология» были выполнены анализы: рентгенофазовый на приборе D2 PHASER компании Bruker и определен минеральный состав с содержанием в породе более 1 %; инструментальный нейтронно-активационный анализ и определены следующие элементы: La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb и Lu. Фирсовым А. П. был выполнен энергодисперсионный анализ, результаты которого дарены автору в пользование. Из каждого каменного образца были изготовлены шлифы, часть из них изучена на поляризационном и сканирующем электронном микроскопах. Несколько образцов были подвергнуты f-радиографии. В качестве детектора использовались слюда и лавсан.

Помимо представленных выше собственных данных в работе для сравнения используются данные по лампрофирам Рудных гор Германии, которые детально описаны Томасом Зейфертом.

Абсолютный возраст лампрофиров чуйского комплекса определен Васюковой Е. А. Ar–Ar и U–Pb геохронологическими методами. Ею уточнены и расширены границы времени проявления комплекса и выделены два этапа формирования: 251–242 и 236–234 млн лет. Возраст Ербинского некка был определен также предшественниками 250 млн лет. Возраст лампрофиров Рудных гор – карбон-пермь, от 328 ± 7 до 294 ± 6 млн лет.

Результаты и их обсуждение

Минеральный состав анкаратритов Ербинского некка (образец № 4, X10EH7) (%): группа пироксена до 50, две генерации флогопита до 14, фельдшпатоиды 11, пектолит 8, форстерит (оливин) 6, апатит, кальцит, пирит, магнетит, гранат 1–5. Минеральный состав минетт чуйского комплекса (%): калиевый полевой шпат 42–64, плагиоклаз 0,2–0,7, клинопироксен 7–20, биотит/флогопит 9–18,8, псевдоморфозы по оливину 1–6, апатита до 4,3, акцессорные минералы (ильменит, титаномагнетит, сфен, рутил, брукит, циркон и др.) до 6,6. Керсантиты состоят из (%): плагиоклаза 40–68, клинопироксена 14–25, биотита/флогопита 7–30, акцессорных (апатита, титаномагнетита, сфена) 1,5–4,5.

Петрохимический состав рассматриваемых пород представлен от щелочных пикритов до трахитов. Содержание кремнезема в породах меняется от 36 до 60 % [2]. Породы обладают довольно высоким суммарным содержанием щелочей – точки составов располагаются вдоль условной границы между умеренно-щелочными и щелочными породами. Они лежат в одной области со слюдяными минеттами Erzgebirge (LD2a) и близки к слюдяному порфировому переходному типу кенсантит/минетта (LD2c) [10] (рис. 1). По типу щелочности анкаратриты Ербинского некка относятся к калиево-натриевому типа, а лампрофиры чуйского комплекса к калиевым. Породы Ербинского некка отличаются от лампрофиров Горного Алтая и Германии более низкими содержаниями SiO_2.

Главной особенностью изучаемых лампрофиров являются повышенные содержания U и Th. По содержанию урана анкаратриты Ербинского некка и лампрофиры чуйского комплекса сопоставимы с слюдяными минеттами Рудных год Германии и с слюдяным порфировым переходным типом керсантит/минетта Рудных год Германии (табл. 1). Из всех

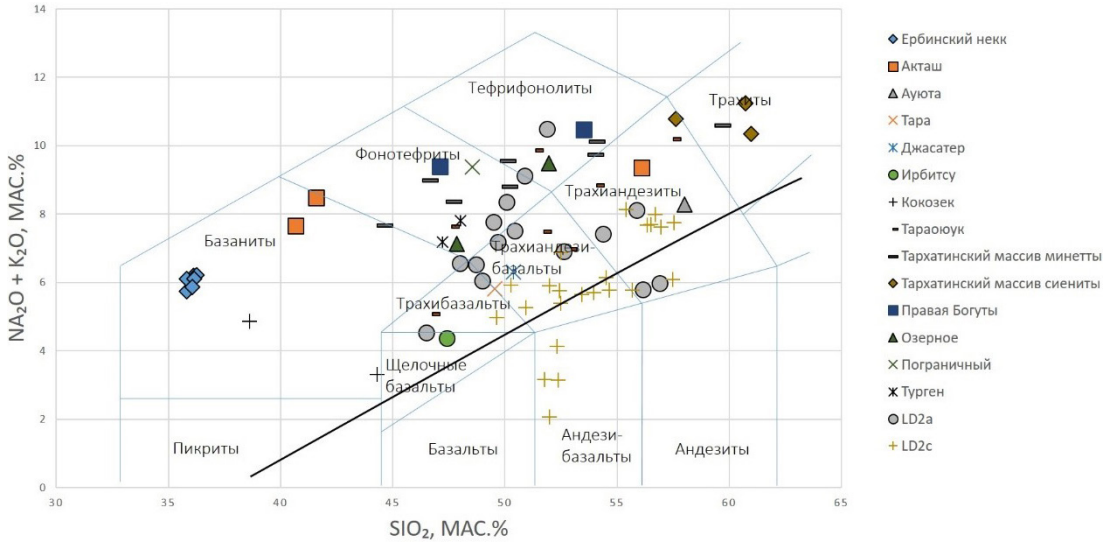


Рис. 1. TAS- диаграмма лампрофиров

Таблица 1. Содержания урана и тория в лампрофирах

Ареал	U, ppm	Th, ppm	Th/U
Ербинский некк	7,3 (2,8–10,9)	21,5 (10,6–41,9)	3 (1,6–6)
Горный Алтай	9,3 (4,2–16,1)	61,8 (18–136)	6,6 (3–17)
LD2a (Слюдяные минетты, Erzgebirge)	8,6 (1,6–14,6)	50,7 (8,9–94,3)	5,7 (4,1–6,5)
LD2c (Слюдяной порфировый переходный тип кенсантит/минетта)	7,9 (3,5–14,5)	31,9 (13,1–58,1)	4,1 (1,5–5,3)

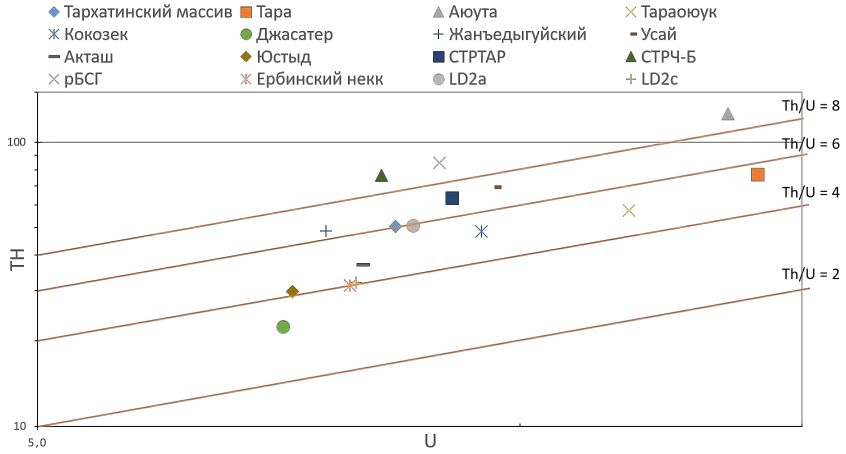


Рис. 2. Положение пород в полях U–Th

исследуемых пород лампрофиры Горного Алтая выделяются высокой ториеносностью, достигающей в некоторых образцах свыше 100 г/т. Данные по содержаниям элементов в породах получены посредством ИНАА. Следует также отметить, что по уровню накопления урана и тория породы Ербинского некка соответствуют щелочным сиенитам Енисейского кряжа [5]. А породы Горного Алтая близки к калиевым щелочно-ультраосновным дайковым породам массива Томтор [6]. Породы Ербинского некка также отличаются от пород Горного Алтая торий-урановым отношением, в первом оно колеблется от 1,6 до 6 и равно в среднем 3, когда в последнем при среднем 6,6 колеблется от 3 до 17, что свидетельствует о различных процессах рудообразования в данных комплексах (рис. 2).

Изучение радиографий шлифов показало, что для образцов Горного Алтая характерно равномерное распределение треков по всему шлифу. Иногда встречаются более плотные скопления треков, которые указывают на урансодержащие минералы. Также было найдено несколько «ежиков», в которых невозможно посчитать количество треков, автор предполагает, что это собственные наноминералы урана. Следует отметить, что треков не было замечено во флогопите (биотите). Для Ербинского некка характерно более равномерное распределение треков в неизмененной части шлифа. В измененной же встречаются треки повышенной плотности, что, как и в Горном Алтае, свидетельствует о наличии урансодержащих минералов.

При помощи сканирующей электронной микроскопии в Ербинском некке были совершены находки галенита, (предположительно) пирохлора с торием (0,8–13,2 %) и ураном (0,7–10,6 %). В образцах лампрофиров Горного Алтая найден циркон с торием (1,1–12,6 %) и ураном (0,9–1,4), оксид свинца.

Заключение

Установлено, что уран в породе находится в следующих формах: в форме молекулярного рассеяния, образуя редкие, равномерно расположенные треки от осколков вынужденного деления U^{235}; изоморфное нахождение в апатите, где уран образует плотную, равномерно распределённую сеть и в собственно урансодержащих акцессорных минералах из группы пирохлора-бетафита Выявлено 3 минерала, концентрирующих в себе уран и торий: пирохлор в Ербинском некке, циркон и минерал из семейства монацита в лампрофирах чуйского комплекса.

Механизм образования радиогеохимически высокоспециализированных пород может быть связан с процессом трансвапоризации базитовых расплавов, либо образование щелочно-базитовых расплавов связано с декомпрессионным плавлением метасоматизированной мантии.

Проявление лампрофиров с такими геохимическими особенностями в различных районах мира свидетельствует об идентичности их образования в геологических процессах, формировании данных

пород на завершающих стадиях геотектонического развития горно-складчатой области и особенностях металлогении.

Литература

1. Васюкова Е. А. Петрология и флюидный режим формирования лампрофиров чуйского комплекса (Юго-Восточный Алтай – Северо-Западная Монголия) / Е. А. Васюкова, отв. ред. А. С. Борисенко; Ин-т геологии и минералогии им В. С. Соболева СО РАН. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2017. – 158 с.
2. Кенесбаев Б. К., Васюкова Е. А., К вопросу о высоких концентрациях урана и тория в лампрофирах Алтае-Саянского региона, в книге: Новое в познании процессов рудообразования Сборник материалов. – Москва, 2018. – С. 179–181.
3. Ковалев В. П., Мельгунов С. В., Ножкин А. Д., Митропольский А. С. и др. Уран и торий в магматическом и метаморфическом петрогенезисе. – Новосибирск: Наука, 1983. – 184 с.
4. Мельгунов С. В. Радиогеохимия и генезис слюдяных лампрофиров. // Геология и радиохимия Средней Сибири. – Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1985. – С. 141–157.
5. Ножкин А. Д., Кренделев Ф. П., Миронов А. Г., Бобров В. А., Радиоактивные элементы в гранитоидах и сиенитах Енисейского кряжа / Радиоактивные элементы в горных породах, часть 1. – Новосибирск, 1972. – С. 142–143.
6. Панина Л. И., Росокова Е. Ю., Исакова А. Т., Толстов А. В., Элеметы-примеси в щелочных лампрофирах, клинопироксенах и амфиболах Томторского массива и рудоносность формировавших их расплавов / Геохимия, 2018. – № 7. – С. 641–660.
7. Рихванов Л. П., Ершов В. В., Сарнаев С. И., Геохимические особенности щелочных базитов и ультрабазитов Минусинского прогиба / Геохимические ассоциации редких и радиоактивных элементов в рудных и магматических комплексах. – Новосибирск: Наука, 1991. – С. 97–109.
8. Оболенская Р. В. Чуйский комплекс щелочных базальтоидов Горного Алтая // Новосибирск: Наука, 1971. – 141 с.
9. Le Maitre R. W., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas M. J., Bonin B., Bateman P., Bellieni G., Dudek A., Efremova S., Keller J., Lameyre J., Sabine P. A., Schid R., Sørensen H., Woolley A. R. Igneous rocks - a classification and glossary of terms. Cambridge University Press, 2nd edition. – Cambridge, 2002. – 236 p.
10. Thomas Seifert, Metallogeny and petrogenesis of lamprophyres in the Mid-European Variscides. – IOS Press, 2008. – 305 p.
11. Woolley A. R., Bergman S., Edgar A. D., Le Bas M. J., Mitchell R. H., Rock N. M. S., Scott Smith B. H. Classification of lamprophyres, lamproites, kimberlites, and the kalsilitic, melilitic, and leucitic rocks. The Canadian Mineralogist 34, 1996. – P. 175–186.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА РОССИИ

В. Е. Кириллов

Институт тектоники и геофизики (ИТиГ ДВО РАН)
Хабаровск, Россия, kirillov@itig.as.khb.ru

METALLOGENY OF RADIOACTIVE ELEMENTS IN THE RUSSIAN FAR EAST

V. E. Kirillov

Institute of Tectonics and Geophysics (ITiG FEB RAS)
Khabarovsk, Russia, kirillov@itig.as.khb.ru

The Far Eastern region of Russia is characterized by a variety of formation types of uranium and thorium mineralization belonging to the Archean, Proterozoic, Riphean, Paleozoic, Late Mesozoic and Cenozoic metallogenic epochs. The most practically important of the uranium-ore formations are the molybdenum-uranium formation in berezites and argillizites, and the gold-uranium formation in humbeites. A uranium «unconformity-type» formation is considered as promising. The uranium-ore and potentially uranium-ore provinces (Aldan-Stanovaya, Bureinskaya, Khankai, East Chukotka, and Okhotsk) and the ore regions within them are confined to Precambrian basement blocks, where they are associated with ore-bearing metasomatites, in volcanic-tectonic, fault, or intrusive-dome structures.

Введение

Дальневосточный регион (включая Северо-Восток и республику Саха-Якутия) является наиболее крупным в России (более 37 % ее территории) и характеризуется разнообразием геологических и металлогенических обстановок.

Многолетние (с 1934 г) поисковые, разведочные и научно-исследовательские работы на территории Дальневосточного региона (ДВР) привели к выявлению на его территории 36 урановых месторождений и 328 перспективных урановых рудопроявлений [4]. Поисками уранового минерального сырья занимались территориальные геологические управления – Дальстрой МВД СССР (1946–1955) и специализированные экспедиции (Сосновская, Октябрьская, Таежная, 1952–2002 гг.) в сотрудничестве с научными учреждениями (ВИМС, ВСЕГЕИ, ДВИМС).

В комплекс работ входили аэрогеофизические и наземные поисковые радиометрические и геохимические исследования. Рудные месторождения и рудопроявления изучались с использованием поверхностных горных выработок и бурения. Аналитическое и минералогическое изучение руд проводилось для всех выявленных объектов, начиная с проявлений.

Рудные объекты с ториевой минерализацией на ДВР встречаются заметно реже, и описаны в настоящей работе кратко.

Геологическое строение Дальневосточного региона и краткая радиогеохимическая характеристика пород

Геологическое строение северной части ДВР определяется его положением в пределах восточной окраины Северо-Азиатского кратона и орогенных поясов его складчатого обрамления. Кратон в пределах Дальневосточного региона представлен Сибирской платформой и в ее юго-восточной части Алдано-Становым щитом (АСЩ), а также кратонными террейнами (Охотским, Омолонским).

С юга Северо-Азиатский кратон обрамляется Урало-Монголо-Охотским тектоническим поясом, включающим блоки докембрийского фундамента (Буреинский, Ханкайский массивы).

Восточная часть ДВР представлена северо-западной ветвью Тихоокеанского тектонического пояса, в которой выделяются Верхояно-Колымский и Дальневосточный сегменты. Первый включает ряд орогенных поясов мезозойского и позднемезозойско-кайнозойского возраста, последнему принадлежат мезозойский Сихотэ-Алинский складчатый пояс, а также позднемезозойско-кайнозойская Хоккайдо-Сахалинская складчатая система. На складчатое основание наложены вулканические пояса мелового возраста: в северной части Охотско-Чукотский и Корякско-Чукотский, в южной части – Восточно-Сихотэ-Алинский.

Породы архейского фундамента (гнейсы, кристаллосланцы) характеризуются содержаниями U 0,4–4,3 г/т, Th от 1,2 до 10,5–19,7 г/т. В гранитизированных и калишпатизированных разностях, они увеличиваются: U до 4,7–5,8 г/т, Th 18–20 г/т. В гранитах и пегматитах архейского возраста U содержится в ко-

личестве 3,1–5,5 г/т, иногда до 30 г/т и более, Th до 40 г/т. Платформенные образования чехла в целом отличаются невысоким ураном (1–2 г/т) и торием (2–5 г/т). Углеродсодержащие породы и битуминозные известняки отдельных свит заметно обогащены ураном (7,7–23 г/т).

Складчатые (в основном, терригенные) образования орогенных поясов характеризуются содержаниями U 1,4–1,7 г/т, Th 7–8 г/т.

Более высокие содержания характерны для вулканитов кислого состава: (U 2,8–5 г/т, Th 19,5–25 г/т), для протерозойских; U 3,8–5,8 г/т, Th 19–23 г/т для палеозойских; U 1,5–6,8, до 10,4 г/т, Th 10–34 г/т для мезозойских. Гранитоиды фанерозойского времени еще более специализированы на радиоактивные элементы: (U 3,1–18 г/т, Th 16–35 г/т) для протерозойских, U 3,8–14 г/т, Th 23–48 г/т для палеозойских; U 4–10, Th 12–45 г/т для мезозойских гранитоидов.

На карте металлогенического (для урана) районирования ДВР видно, что большая часть урановорудных провинций и рудных районов (РР) находится в южной части ДВР (рис. 1). Районы приурочены к докембрийским структурам – АСЩ, кристаллическим массивам и кратонным террейнам, то есть, к гранитизированным блокам с максимальной дифференциацией радиоэлементов.

Урановорудные эпохи и формации

Полученный в ходе поисковых и разведочных работ обширный материал позволил типизировать урановые и ториевые рудные объекты по возрасту, условиям локализации и рудно-формационной принадлежности (таблица 1).

Время образования урановых и ториевых объектов ДВР соответствует архейской, раннепротерозойской, рифейской, позднепалеозойской, позднемезозойской и кайнозойской металлогеническим эпохам [2, 4]. Основные закономерности распределения урановой минерализации в геологических структурах рассмотрены в сводной монографии [4] и ряде других работ [1, 3, 5, 7, 8, 11 и др.].

Рудные формации Дальнего Востока относятся к типовым, и названы по [10, 12].

Перечисленные в таблице 1 формации характеризуются разнообразной урановой и уран-ториевой минерализацией. На территории ДВР к настоящему времени выявлено 57 собственно урановых минералов, 22 урансодержащих и уран-торийсодержащих [8]. Кроме того, в рудоносных зонах отмечаются уранконцентрирующие и уранконцентрирующие сорбирующие минералы. Практически наиболее важными являются настурановые руды, связанные с месторождениями мезозойского, реже палеозойского и кайнозойского возраста в связи с вулканогенными и вулканогенно-плутоногенными формациями, что является закономерным и для других районов мира [9, 13]. Кроме того, настуран установлен в березит-аргиллизитовых метасоматитах на проявлениях рифейского возраста в зонах структурно-стратиграфических несогласий АСЩ, что сближает их с известными месторождениями «типа несогласия» Канадского щита [9, 14, 15].

Ториевая минерализация (торит, торианит) имеет докембрийский возраст, характерна для АСЩ и древних массивов, где часто встречается совместно с урановой минерализацией. Значительные (но не промышленные) концентрации встречаются в ореолах кварц-полевошпатовых метасоматитов в гранитоидах Улканского плутона [6].

Основные закономерности пространственного размещения металлогенических зон

Алдано-Становая урановорудная провинция (рис. 1) соответствует Алдано-Становому щиту и является наиболее крупной в ДВР. В ее пределах, проявлено урановое оруденение архейского, протерозойского и мезозойского возрастов.

Уран-ториевые проявления архейского возраста (около 3,4–3,2 млд. лет) встречаются в наиболее древних гранитизированных блоках АСЩ, связаны с пегматоидными гранитами и пегматитами.

Раннекарельская металлогеническая эпоха (2400–2000 млн. лет) отличается многочисленными урановыми и уран-ториевыми проявлениями в пегматитах и кремне-щелочных метасоматитах среди метаморфических пород.

Позднекарельская эпоха (около 1700 млн. лет) характеризуется редкометалльно-редкоземельными месторождениями с U и Th, в фельдшпатитах в экзоконтактах щелочных гранитов Улканского плутона (восток Алдано-Станового щита).

Рифейская эпоха (1300–1100; 760 млн. лет) проявилась на востоке АСЩ (Тырканский, Улканский РР). С ней связан ряд рудных формаций – урановая в эйситах в разломных структурах, урановая «типа несогласия» в зонах докембрийских структурно-стратиграфических несогласий, и уран-торий-редкометалльно-редкоземельная в карбонатитах в интрузиях центрального типа [3, 4].

Позднемезозойская эпоха (160–130 млн. лет) проявилась в центральной части АСЩ (Эльконский РР с месторождениями золото-урановой формации в гумбеитах в разломных структурах в связи с щелочными интрузиями); Сутамское рудное поле, оруденение молибден-урановой формации в аргиллизитах в вулкано-тектонической структуре [3, 4, 12].

Буреинская урановорудная провинция соответствует Буреинскому кристаллическому массиву, где установлено позднепалеозойское (307–260 млн. лет) оруденение (Мельгинский РР, урановая и молибден-урановая формация в березитах в гранитоидах, осадочных и осадочно-вулканогенных породах). Мезозойское (135–80 млн. лет) оруденение принадлежит

фтор-молибден-урановой формации в вулканоструктурах (Малохинганский РР), и урановой формации в угленосных отложениях [1, 4].

Ханкайская урановорудная провинция приурочена к Ханкайскому массиву, где оруденение позднепалеозойского возраста (370–320 млн. лет) относится к ряду формаций: уран-торий-редкометалльной (в эндоконтактах гранитов), урановой в кварц-альбитовых метасоматитах (в терригенных породах в зоне экзоконтактов гранитов), молибден-урановой в березитах в вулканогенно-осадочных депрессионных структурах (Синегорский РР) [1, 4].

Для **Восточно-Чукотской урановорудной провинции**, а также **потенциально-урановорудной Охотской провинции** ведущими являются фтор-молибден-урановая формация в аргиллизитах в вулканоструктурах мезозойского (130–82 млн. лет) и мезозойско-кайнозойского (60–10 млн. лет) возраста (Куйдусунский, Южно-Ульинский, Восточно-Чукотский РР). В Восточно-Чукотском РР отмечаются урановые проявления современного возраста (10–0 млн. лет) в травертинах современных термальных источников.

Заключение

Дальний Восток России характеризуется многообразием урановых (18) и урансодержащих (9) формаций, со своими минеральными типами [7, 8]. Наиболее практически важными из них являются молибден-урановая в березитах и аргиллизитах и золото-урановая формации в калиевых метасомати-

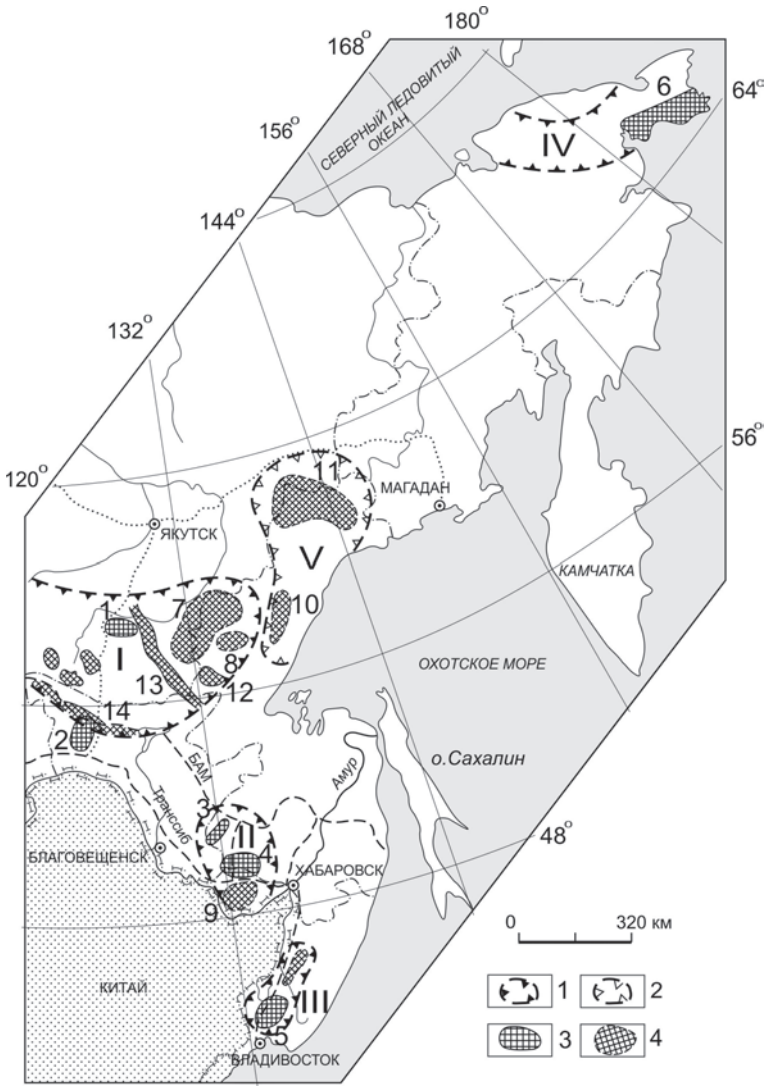


Рис. 1. Урановорудные и потенциально урановорудные провинции и районы Дальнего Востока (по [4], с дополнениями)

1–2 – провинции: 1 – урановорудные: Алдано-Становая (I), Буреинская (II), Ханкайская (III), Восточно-Чукотская (IV); потенциально-урановорудная: Охотская (V); 3 – районы: урановорудные: Эльконский (1), Уруша-Ольдойский (2), Мельгинский (3), Малохинганский (4), Синегорский (5), Восточно-Чукотский (6); 4 – потенциально-урановорудные: Учуро-Майский (7), Улканский (8), Кимканский (9), Южно-Ульинский (10), Куйдусунский (11), Тырканский (12); металлогенические потенциально урановорудные зоны (МПЗ): Тыркандинская (13), Зее-Бурпалинская (14).

Таблица 1. Основные формационные типы уранового оруденения Дальнего Востока России

Урановорудные и ураноносные эпохи	Рудные формации	Рудовмещающие структуры	Примеры рудных объектов
Архейская	Уран-ториевые в пегматоидных гранитах и пегматитах	Зоны ультраметаморфизма и гранитизации в метаморфических породах	Проявления АСЩ
Раннекарельская	Торий-урановая, урановая в кварц-полевошпатовых метасоматитах и пегматоидах	Зоны глубинных разломов	Кавли, Сынняр, (АСЩ)
Поздне карельская	Уран-торий-редкометально-редкоземельная в щелочных пегматитах и щелочных метасоматитах	Интрузивно-купольные структуры в вулканогенных прогибах	Бугундя, Ныгваган, Эталон (Улканский прогиб)
Рифейская	Урановая в эйситах	Зоны разломов в метаморфических, интрузивных и вулканических породах	Тавитчак, Тангукта, Боковое (АСЩ)
	Урановая «типа несогласия»	Зоны докембрийских структурно-стратиграфических несогласий	Топорикан, Конкули, Угдан (АСЩ)
	Уран-торий-редкометально-редкоземельная в карбонатитах	Интрузивные структуры центрального типа	Арбарастах, Ингили (АСЩ)
Позднепалеозойская	Уран-торий-редкометалльная в апогранитных метасоматитах	Интрузивно-купольные структуры	Вассиановское, Поперечное (Ханкайский массив)
	Урановая в березитах	Вулкано-тектонические структуры	Блуждающее, Осевое, Искра
	Молибден-урановая в березитах	Зоны разломов в вулканогенно-осадочных депрессионных структурах на метаморфическом основании	Синегорское, Сентябрьское (Ханкайский, Буреинский массивы)
	Урановая в кварц-альбитовых метасоматитах	Интрузивно-купольные структуры и зоны разломов	Липовское, Феникс (Ханкайский массив)
Позднемезозойская	Золото-урановая в гумбеитах	Зоны разломов в метаморфических породах (АСЩ)	Южное, Курунг, Федоровское (АСЩ)
	Урановая в аргиллизитах и березитах	Интрузивно-купольные гранитоидные структуры и зоны разломов	Пакчи, Унин, Мандычен (АСЩ, Верхояно-Колымская складчатая система)
	Ванадий-урановая в березитах	Стратиформные залежи роллового типа в туфогенно-осадочных отложениях с органикой	Атаньджакан (Охотский массив)
	Фтор-молибден-урановая в аргиллизитах	Кальдеры, вулкано-тектонические депрессии, вулкано-купольные структуры, сложенные вулканитами кислого состава	Сутамское (АСЩ), Ласточка, Скальное, Чаплино (Буреинский, Чукотский массивы)
	Урановая в угленосных отложениях	Угленосные впадины на щитах и докембрийских массивах	Озерное, Чекундинское (Буреинский массив)

тах (гумбеитах). Как перспективная, рассматривается урановая «типа несогласия» формация. Ураноносные формации более характерны для докембрия, урановорудные масштабнее проявились в мезозое.

Урановорудные провинции приурочены к докембрийским блокам фундамента. Из них Алдано-Становая, Ханкайская и Буреинская провинции являются наиболее продуктивными на радиоактивное сырье и характеризуются как известными урановорудными районами, так и потенциально-рудными районами со значительными перспективами выявления новых месторождений.

Литература

1. Ван Ван Е А. П. Типы уранового оруденения Дальнего Востока // Тихоокеанская геология, 1996. – № 2. – С. 126–133.
2. Горошко М. В. Новые данные по абсолютному возрасту редкометалльного оруденения юго-восточной части Алданского щита / М. В Горошко, В. Е. Кириллов // Труды ассоциации «Дальнедра». – Хабаровск, 1992. – Вып. 2. – С. 66–69.
3. Горошко М. В. Минералого-геохимические типы урановых проявлений юго-восточной части Сибирской платформы / М. В. Горошко, В. А. Гурьянов, В. Е. Кириллов // Тихоокеанская геология, 1999. – № 1. – С. 90–102.
4. Горошко М. В. Металлогения урана Дальнего Востока России / М. В. Горошко, Ю. Ф. Малышев, В. Е. Кириллов. – М.: Наука, 2006. – 372 с.
5. Кириллов В. Е. Металлогения урана Ульинского и Куйдусунского вулканогенных прогибов / В. Е. Кириллов, М. В. Горошко // Тихоокеанская геология, 1996. – № 3. С. 88–97.
6. Кириллов В. Е. Торий в вулканических и интрузивных породах Улканского прогиба // Материалы конференции «Гранитоидные вулкано-плутонические ассоциации». – Сыктывкар, 1997. – С. 65–66.
7. Кириллов В. Е. Рудные формации урановых месторождений Дальнего Востока России // Материалы конференции «Геохимия и рудообразование радиоактивных, благородных и редких металлов в эндогенных и экзогенных процессах». – Улан-Удэ, 2007. – С. 84–87.
8. Кириллов В. Е. Урановые и урансодержащие минералы Дальнего Востока России // Материалы по геологии месторождений урана. – М.: РИС ВИМС, 2008. – Вып. 152. – С. 167–187.
9. Лаверов Н. П. Зарубежные месторождения урана / Н. П. Лаверов, А. О. Смилкстын, М. В. Шумилин. – М.: Недра, 1983. – 320 с.
10. Машковцев Г. А. / Промышленные генетические типы урановых месторождений / Г. А. Машковцев, Я. М Кисляков, А. К. Мигута // Отечественная геология, 1998. – № 4. – С. 13–20.
11. Мигута А. К. Состав и парагенетические минеральные ассоциации урановых руд Эльконского района (Алданский щит, Россия) // Геология рудных месторождений, 1997. – № 4. – С. 323–343.
12. Строна П. А. Главные типы рудных формаций. – Л.: Недра, 1978. – 199 с.
13. Locardi E. Uranium in acidic volcanic environment // Uranium deposit in acidic volcanic rocks. Vienna, 1985. – P. 17–28.
14. Paquet A., Weber F. Petrographie et mineralogue des halos d alteration autor du gisement de Cigar Lake et leurs relanion avec les minerallisation / A. Paquet, F. Weber // Can. J. Earth Sci., 1993. – Vol. 30. – P. 674–688.
15. Rimsaite J. Mineral assemblages at Rabbit Lake uranium deposit, Saskatchewan: preliminary report. // Geol. Sur. Can. – Paper 77–1, part B. – 1977. – P. 235–246.

ПЛЕЙСТОЦЕНОВЫЙ ЭНДОГЕННЫЙ УРАН-ПОЛИЭЛЕМЕНТНЫЙ РУДОГЕНЕЗ В ОКРАИННО-КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ВОСТОКА АЗИИ

А. А. Коковкин

ИТиГ ДВО РАН
kokovkin@itig.as.khb.ru

THE PLEISTOCENE URANIUM-POLYELEMENT ORE GENESIS IN THE CONTINENTAL MARGIN STRUCTURE OF EASTERN ASIA

A. A. Kokovkin

Institute of Tectonics and Geophysics, Far East Branch, Russian Academy of Sciences
kokovkin@itig.as.khb.ru

The paper presents the results of the investigation of Pleistocene endogenous uranium-polyelement ore genesis in the continental margin structure (CMS) of eastern Asia. It examines its relationship with the specifics of the formation of this structure. The ore genesis evolved at the termination phase of Pliocene-Pleistocene mantle activation of the CMS, which was explicitly displayed by large (relict) fields of plateau basalts of similar age. The given examples illustrate the development of the uranium mineralization in plateau basalts. The ore genesis control by low-temperature argillizite metasomatism coming from activated faults in the basement of the depressions into their sedimentary cover is shown by examples of manifestations of polyelement U–Tr–Ge mineralization in modern depressions of southern Primorye. The faults appear to be the ore-supplying channelways and, at the same time, the ore-hosting structures providing high mineral potential. Shown large-scale transformations of Pleistocene mineralization by Holocene tectonics and erosion require their taking into consideration for the development of the prediction and exploration models.

Плейстоценовый эндогенный рудогенез получил развитие по всей континентальной окраине Азии и в зоне перехода континент-океан. Следы его отмечены и в глубине континента. Однако системное изучение этого рудогенеза ранее не проводилось. Изучались лишь отдельные его проявления, без анализа их позиции в эволюционирующей вмещающей структуре и без изучения пострудных перестроек. Здесь будет обозначена потенциальная масштабность этого молодого рудогенеза и показаны его особенности в специфической по характеру развития окраинно-континентальной структуре (ОКС) Востока Азии.

Эту ОКС (рис. 1) отличает высокая активность новейшего (эоцен-голоценового) этапа ее развития. Парадоксально, но эта самая молодая составляющая геологической истории, наиболее выраженная в ее признаковом пространстве, отличается острым дефицитом геологической информации, и в том числе дефицитом сведений по плейстоценовому рудогенезу. И вовсе не изучена здесь завершающая, голоценовая фаза новейшего этапа с ее пострудными перестройками. На Востоке Азии, как и во всей крнтинентальной геологии, основное внимание традиционно уделяется более ранним геологическим эпохам.

Автором структура ОКС изучается почти 50 лет. Исследования проводятся в рамках параллельно разрабатываемой модели волновой нелинейной геодинамики (далее – волновая модель) [1–3], развивающей гипотезу пульсационного развития Земли. В соответствии с волновой моделью, формируемой на основе синергетической методологии, открытая система нашей планеты наращивает свою сферически-зональную структуру в пульсационном режиме, за счет энергии и вещества земного ядра. В континентальную кору глобальные пульсации транслируются пульсациями мантии – ее суперплюмов и внутриконтинентальных плюмовых систем. Они инициируют возвратно-поступательные перемещения жестких блоков коры – крупных (плит, кратонов) и более локальных в подвижных поясах. Перемещения этих жестких блоков сопровождаются образованием разломов, контролирующих развитие рифтогенных и орогенных систем. Разломы развиваются в волновом (маятниковом) режиме знакопеременного сдвига (ЗПС). Разработанная автором ЗПС-модель [3] объясняет фрагментированность разломов и сохранность целостности контролируемых ими геологических структур.

Глобальные пульсации достаточно уверенно фиксируются с мезозоя, со времени появления близкой современной системы континентов и суперплюмов. В мезозое-кайнозое проявлено два ритма расширения (триас – нижний мел, эоцен – неоплейстоцен) и два ритма сжатия (поздний мел-палеоцен и голоцен). Импульсный в геологическом понимании голоценовый ритм зажат в 10000 лет. Однако он существенным образом преобразовал структуру Земли, ее континентов и океанов. Но в геологии эти преобразования, «по умолчанию», не существуют. В ней сформировался устойчивый стереотип «не замечать» феномена голоценовой активизации.

ОКС Востока Азии и зона перехода континент–океан формировались в мезозое – кайнозое взаимо-

действующими структурами двух подвижных поясов – Альпийско-Гималайского (АГПП) и Тихоокеанского (ТОПП). Формирование их внутреннего строения определил пульсационный пресс двух кратонов (Сибирского, Китайского) и Тихоокеанской плиты – западной части одноименного суперплюма. В голоцене структурирующий ОКС трехсторонний пульсационный пресс был активизирован и существенным образом дополнен движением к северу плиты Индии и Филиппинской плиты. В мезозое-кайнозое, в ходе этого сложноорганизованного взаимодействия, кора Евразийского континента системно наращивалась к востоку. Омолаживались при этом и структурирующие ее процессы – гранитообразование, орогенез, рифтогенез, седиментогенез, литификация осадков рифтогенов, нефтегазообразование и эндогенноый рудогенез [1].

В плиоцене – среднем плейстоцене ритм новейшего расширения был осложнен дополнительным импульсом мантийной активизации, с развитием на Востоке Азии плато-базальтов. Тренд омоложения коры был при этом нарушен. По структуре АГПП плато-базальты проникли и в глубину континента. Позднее все они были взломаны голоценовым орогенезом и существенным образом эродированы. От эрозии сохранились их фрагменты на бортах Сихотэ-Алинского орогена (Борисовское, Шуфанское, Совгаванское и другие плато), отдельные плато на Сахалине и на Буреинском массиве (Сулукское и Хинганское), на Становике (плато Ток), на сочленении Амуро-Зейской впадины с впадиной Сунляо, также в Монголии и в Забайкалье.

В среднем плейстцене, на завершающей фазе этой мантийной активизации, в ОКС получил развитие низкотемпературный аргиллизитовый метасоматоз и связанный с ним уран-полиэлементный рудогенез. Развитие этого рудогенеза было детально изучено автором в Южном Приморье, в Синегорской рудно-магматической системе (СРМС) [3]. В рыхлом, обводненном, проработанном аргиллизитовым метасоматозом осадочном чехле новейших Приханкайских впадин, вложенных в специализированные на уран силурийские граниты и девон-карбоновые вулканиты СРМС, плейстоценовым рудогенезом было сформировано Раковское месторождение урана, 20 урановых рудопроявлений, многочисленные аномалии урана, два месторождения германия (Раковское и Павловское) и Лузановское TR–U–Ge рудопроявление.

Раковское месторождение урана использовано в качестве эталонного объекта для разработки модели плейстоценового рудогенеза. Было установлено, что активизированные в плиоцен-плейстоценовое время разломы фундамента впадины являются подводящими каналами для развития метасоматоза и полиэлементного оруденения. Помимо урана, в состав оруденения здесь входит целый ряд других элементов: Mo (до 0,2 %), Y (до 0,02 %), Ce (до 0,1 %), La (до O,01 %), Sc (до 15 г/т), Ga (до 50 г/т), W (до 0,1 %), F (до 1500 г/т), Ge (до n × 100 г/т) и др. Урановая минерализация представлена коффинитом и оксидами урана, иногда нингиоитом. В ассоциации с ними находится глобулярный и тонко-мелкокристаллический пирит. В контуре рудных залежей встречается флюорит – кристаллический в породах фундамента и метамиктный (ратовкит) в осадочном чехле.

Особая роль в рудоконтроле принадлежит базальному слою, слагающему основание осадочного разреза впадины. Этот слой «скользит» во времени вверх по бортам впадин, по мере их развития. Он хорошо проницаем и открыт на проницаемые горизонты внутренней части осадочного чехла, объединяя их в единую гидродинамическую систему и контролируя развитие в ней объемного метасоматоза и рудогенеза. В Раковской впадине тыловая зона метасоматоза представлена аргиллизитами опал-каолинитового состава. Базальный слой в ее самой глубокой части преобразован ими до литифицированного состояния. Здесь над ним, в нижних угольных пластах, на контрастном восстановительном и сорбционном барьере сформировано германиевое месторождение. Основная часть уранового оруденения локализована в северной (прибортовой) части впадины, в зоне сульфидно-карбонатно-гидрослюдисто- каолинитовых аргиллизитов внешней зоны метасоматоза – в базальном слое и в открытых на него угольных пластах. Единичными скважинами оруденение прослежено и в активизированные, раскрытые и обводненные разломы специализированного (Cu > 10 г/т) гранитного фундамента впадины, с отрывом от осадочного чехла до 100 м и более. Подобные ситуации были вскрыты также в других впадинах СРМС – в частности, в Поисковой, Вадимовской и в Жариковской.

Следует заметить, что поиски на уран в южном Приморье были ориентированы строго на оруденение в осадочном чехле. Находки в фундаменте были, по сути, случайными. Они появлялись при вскрытии скважинами ситуаций, когда оруденение непосредственно переходило из чехла в разломы фундамента. Но такой их случайный характер указывает на то, что разломы, контролирующие эти впадины, являются потенциально рудоносными.

На это указывает и наличие плейстоценового оруденения в зонах разломов за контуром впадин. Показательно в этом плане вскрытое дорожным карьером рудопроявление Абрамовское, расположенное на северо-западном обрамлении Павловской впадины. Локализовано оно в ксенолите провеса кровли силурийских гранитов, в узле пересечения разломов Вассиановской (широтной) и Эхилкан-Ханкайской зон. Ксенолит деформирован плейстоценовой и голоценовой (пострудной) тектоникой и проработан аргиллизацией. Деформировано, аргиллизировано и вложенное в него силловидное тело плейстоценовых базальтов. Аргиллизиты, по данным

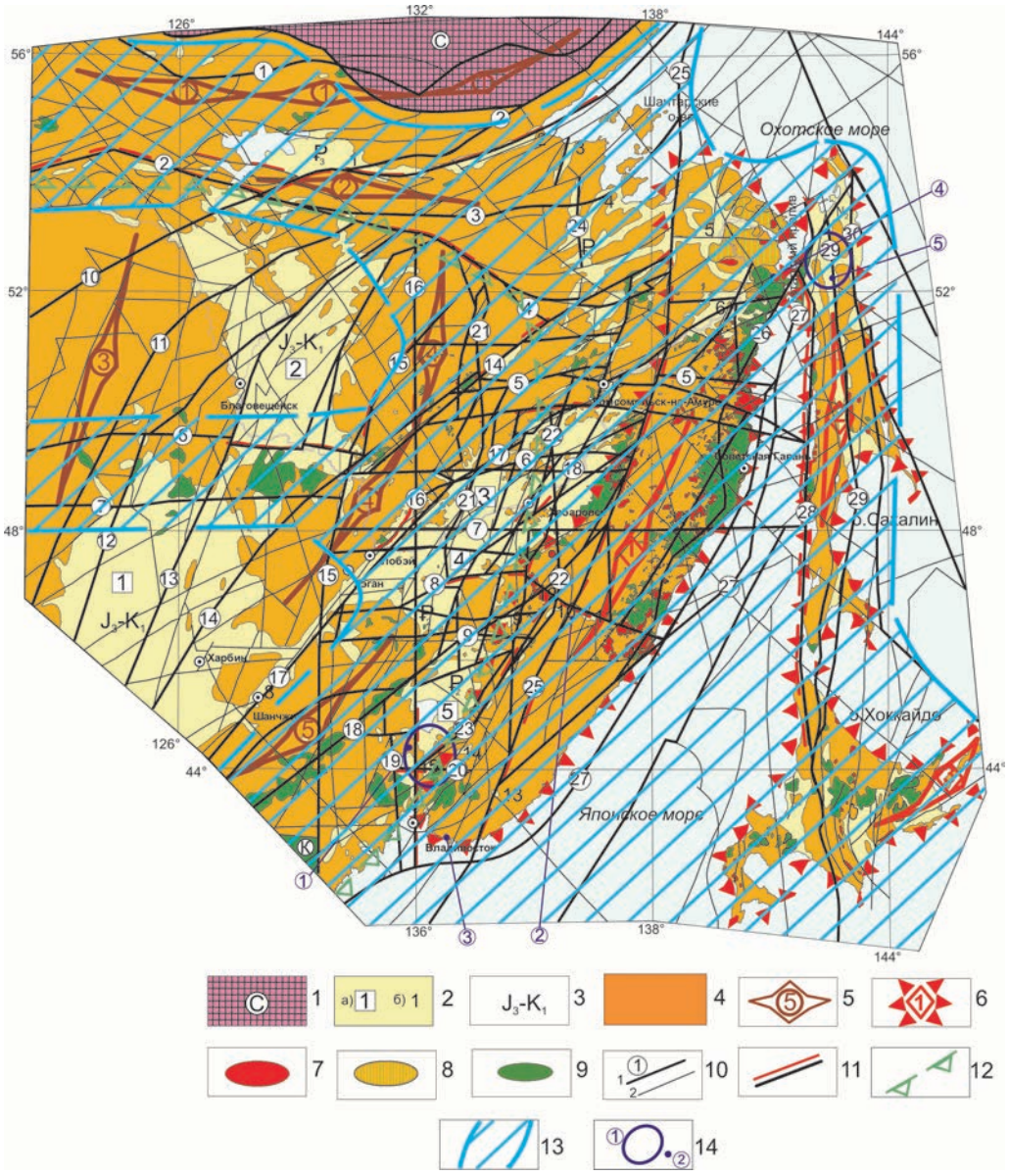


Рис. 1. Позиция плейстоценового рудогенеза в ОКС Востока Азии

1. Структуры Сибирского (С) и Китайского (К) кратонов. 2. Мезозойско-кайнозойские рифтогенные структуры: а) Сунляо – Амуро-Зейской (1 – Сунляо, 2 – Амуро-Зейская) и Амуро-Ханкайской (3 – Средне-Амурская, 4 – Саньцзян, 5 – Приханкайская) системы; б) локальные рифтогенныеструктуры: Верхне-Зейская (1), Боконская (2), Торомская (3), Тугурская (4), Чля-Орельская (5), Удыльская (6) впадины; Курский грабен (7), прогиб Тан-Лу (8); Нижне-Бикинская (9), Средне-Бикинская (10), 11 Верхне-Бикинская (11), Алчанская (12), Приоблачная (13), Реттиховская (14), Раковская (15) впадины. 3. Возраст заложения мезозойско-кайнозойских рифтогенов. 4. Образования фундамента мезозойско-кайнозойских рифтогенных структур. 5. Оси новейших орогенов с амагматичным режимом развития (1 – Алдано-Становой, 2 – Северо-Буреинский, 3 – Большого Хингана, 4 – Восточно-Буреинский, 5 – Ляолинский). 6. Новейшие орогены с магматогенным режимом (1 – Сихотэ-Алинский, 2 – Хоккайдо-Сахалинский, 3 – Курило-Камчатский). 7. Массивы олигоценовых гранитов. 8. Поля вулканитов дифференцированных формаций эоцена-олигоцена. 9. Поля неоген-плейстоценовых платобазальтов. 10. Активные в новейшее время глубинные разломы первого (1) и более низкого (2) порядков: 1 – Становой, 2 – Монголо-Охотский, 3 – Южно-Тукурингрский, 4 – Пауканский, 5 – Гур-Комсомольский, 6 – Намурхэ-Бирский, 7 – Намурхэ-Амурский, 8 – Наолихэ- Бикинский, 9 – Северо-Ханкайский, 10 – Дербур, 11 – Большого Хингана, 12 – Цицикар-Селемджинский, 13 – Шанси-Селемджинский, 14 – Инкоу-Хинганский, 15 – Муданьцзян-Мельгинский, 16 – Эхилкан-Ханкайский, 17 – Танлу-Курский, 18 – Фушунь-Мишань – Алчанский, 19 – Западно-Приморский, 20 – Южно-Приморский, 21 – Тастахский, 22 – Петропавловский, 23 – Синегорский, 24 – Комсомольско-Тугурский, 25 – Центральный Сихотэ-Алинский, 26 – Восточный Сихотэ-Алинский, 27 – Татарского пролива, 28 – Западно-Сахалинский, 29 – Центрально-Сахалинский, 30 – Восточно-Сахалинский. 11. Разломы с признаками современной активности. 12. Контур Аргуно-Ханкайского мегасвода. 13. Зона плейстоценового рудогенеза. 14. Контуром выделены группы проявлений плейстоценового рудогенеза Синегорской РМС (1) и на севере Сахалина (5). Справа внизу точки с номерами проявлений: 2 – в Приоблачной впадине; 3 – в Шкотовской впадине; 4 – в базальтах на восточном борту Татарского пролива. По [3], с изменениями и дополнениями.

В. В. Середина с соавторами [4], представлены здесь набором глинистых минералов (V–Ba–серицит, мета-галлуазит, бейделлит, TR-содержащий нонтронит, каолинит), также гематит, кварц, кальцит и редкоземельные карбонаты. Содержание элементов иттриевой группы достигает здесь ураганных значений (> 10 %). И вся эта структура, вместе с ее оруденением, была вскрыта эрозией, с уровнем среза в десятки метров. Но для этого нужно было сначала взбросить ее голоценовой тектоникой.

Характер пострудных трансформаций еще более ярко виден на примере Лузановского U–TR–Ge рудопроявления, расположенного в том же структурном узле, в 5 км севернее Абрамовского рудопроявления. Вмещающая его структура – реликт крупного тектонического клина (2 км по простиранию) в активизированной в голоцене широтной зоне Вассиановского разлома. Этот клин был препарирован синхронно развивающейся эрозией. Голоценовой сдвиг-надвиговой тектоникой была взброшена и деформирована вся структура Павловской впадины. Лузановский клин – фрагмент эродированной северо-восточной части этой впадины. Выполнен клин миоценовыми осадками с пластами бурого угля промышленной мощности. Верхняя часть осадков клина снята эрозией, а нижняя с вмещающим оруденение угольным пластом срезана пологим (надвиговым) нарушением. Базальный слой здесь отсутствует – он срезан надвигом.

Судя по всему, контуры Павловской впадины и всей системы Приханкайских впадин во время плейстоценового рудогенеза были значительно шире, по сравнению с их современным состоянием. Проведенными реконструкциями установлено, что все Приханкайские впадины были взброшены в голоцене Сихотэ-Алинским орогеном, выведены из седиментации и находятся сейчас в фазе активной эрозии. Для них характерен полого-всхолмленный рельеф.

Зона Вассиановского разлома на протяжении более 50 км к востоку от Абрамовского проявления содержит близкие по характеру проявления аргиллизации с редкоземельным оруденением на обрамлении Павловской и Вассиановской впадин. Это такие же, случайно вскрытые дорожными карьерами находки. К этому нужно добавить, что в пределах Павловской впадины Вассиановский разлом контролирует Григорьевское проявление урана, в котором опоискован лишь осадочный чехол.

Упомянутая выше Эхилкан-Ханкайская зона меридиональных разломов контролирует германиевое и урановое месторождения Раковской впадины и компактное Павловское месторождение германия с урановым оруденением на его периферии. А севернее в ней, на западном борту (в фундаменте) Вадимовской впадины локализовано рудопроявление урана Березянское-1. Эта зона несет следы плейстоценового рудогенеза на расстоянии более 100 км.

Судя по всему, все известные в современной структуре СРМС плейстоценовые проявления представляют собой лишь фрагменты единой зоны рудогенеза, контролируемой активизированными в плейстоцене разломами и существенным образом трансформированной пострудной тектоникой и эрозией. При этом контролирующие эту зону разломы являются одновременно и рудовмещающими. Минеральный ресурс этих разломов еще предстоит оценить.

Значительная роль урана в плейстоценовом рудогенезе обусловлена высокой специализация на него магматических комплексов СРМС. За контуром этой РМС, где вмещающая среда на уран не специализирована, доля урана в элементном спектре этого рудогенеза нерегулярно снижается. Примером является Шкотовское германиевое месторождение в одноименной (новейшей) впадине на восточном борту Сихоте-Алинского орогена, германиевые объекты Нижне-Бикинской впадины, расположенной на его западном борту, проявления германия в Оборском и Хабаровском грабенах (Средне-Амурская впадина) и др.

Характер плейстоценовой полиэлементной минерализации и масштабность пострудных трансформаций иллюстрирует и ситуция Приоблачной (Березовой) впадины (см. рис. 1). Впадина приурочена к осевой части Сихотэ-Алинского орогена, к узлу пересечения широтного Милоградовского разлома с зоной субмеридионального Центрального Сихотэ-Алинского разлома. В осадочном угленосном разрезе этой миоценовой структуры, насыщенном туфовым материалом, проявлены дислокации с зонами брекчирования, с развитием кварцевого штокверка, кварц-цеолитового метасоматоза и более локальными зонами кварц-серицит-хлоритовых и кварц-каолинитовых изменений (данные В. В. Середина, 1991 г.). Рудная минерализация развита в приконтактовых частях угольных пластов. Содержание основных рудных элементов в золах углей составляет: Ge (до 0,5 %), W (до 0,15 %), Zr (до 0,3 %), Be (до 0,03 %), Ni (до 0,1 %). Структура этой впадины расположена на высоте около 1500 м. Это, по всем признакам, реликтовый блок, взброшенный в голоцене Сихотэ-Алинским орогеном с амплитудой в сотни метров. В радиогеохимическом поле, по данным АГСМ-съемки Таежного ФГУП, Приоблачная впадина выделяется аномально высокими содержаниями урана.

На севере Схалина, на западном берегу Татарского пролива в береговом уступе, сложенном плейстоценовыми плато-базальтами, известны радиоактивные аномалии интенсивностью более 200 мкР/ч. Восточнее, в центре острова, известна группа многочисленных, но практически не изученных аномалий, выявленных массовыми поисками на уран при гамма-каротаже сейсморазведочных скважин. Эти поверхностные аномалии, интенсивностью десятки – первые сотни мкР/ч, приуроченные к рыхлым кон-

тинентальным осадкам плиоцена (нутовская свита), расположены в зоне влияния Восточно-Сахалинского глубинного разлома. По данным Октябрьской экспедиции (1962 г.), на участке Моховском одна из аномалий была вскрыта шурфами. Оруденение представлено на нем черными рыхлыми песками. По результатам повторного опробования этого участка, выполненного в 1995 г., в ФГУП «Таежгеология» было проведено минералогическое изучение этих экзотических руд. Черный цемент песков представлен пылеватой сыпью цералита (метамиктная разность монацита). Содержание урана и тория в пробах до 0,07 % (данные РСА), TR – до 2 % и более.

На урановую продуктивность плейстоценового рудогенеза в зонах Хоккайдо-Сахалинской системы глубинных разломов указывает и наличие в ней рудных объектов Японии (Нинге-Теге, Тоно). О продуктивности и полиэлементном характере этого рудогенеза свидетельствует также золотосеребряное месторождение Хисикари (Япония, о. Кюсю). Возраст его оруденения, по данным калий-аргонового и палеомагнитного методов составляет 0,84–1,1 млн. лет.

Упомянутое выше проявление урана в плиоцен-плейстоценовых базальтах не единично. По данным А. С. Серых (ВИРГ, устное сообщение, 1999 г.), на побережье Желтого моря (береговой уступ в районе Циндао, КНР) в подошве покрова базальтов развита жильная настурановая минерализация. В подстилающих этот покров неогеновых осадках (в песках и в окремненных стволах деревьев) получили развитие урановые слюдки. В Забайкалье на Витимском базальтовом плато Сосновским ПГО выявлено урановое рудопроявление Вершинное, локализованное в аргиллизированном некке плиоценового вулкана. Проявления в базальтах – прямое свидетельство связи плейстоценового оруденения с мантийной плиоцен-плейстоценовой активизацией.

Представленные здесь сведения позволяют в предварительном виде оконтурить зону плейстоценового рудогенеза в окраинно-континентальной структуре Востока Азии (см. рис. 1). Эта зона занимает вполне закономерное положение на тренде омоложения континентальной коры, с учетом его нарушения плиоцен-плейстоценовой мантийной активизацией. На востоке она захватывает структуру Хоккайдо-Сахалинского орогена, а в глубину континента распространяется по Монголо-Охотской и Намурхэ-Амурской системам разломов, с развитыми в них реликтами плато-базальтов. Дальнейшее изучение плейстоценового рудогенеза необходимо проводить с учетом специфики развития вмещающей структуры и ее радиогеохимической специализации, с поправками на пострудную (голоценовую) тектонику и эрозию.

Литература

1. Коковкин А. А. Геодинамическая модель кайнозойского этапа развития континентальной коры юга Дальнего Востока России и уран-полиэлементное рудообразование. Автореферат докт. дисс. – М: РИС ВИМС, 2007. – 50 с. http://vak.ed.gov.ru/announcements/geomin/573/. http://www.dissercat.com/.
2. Коковкин А. А. Эволюция новейшей окраинно-континентальной структуры Намибии и структура-антипод Востока Азии. Опыт междисциплинарного исследования на синергетической основе. Саратов: Приволжская книжная палата, 2014. – 188 с.
3. Коковкин А. А. Эволюция Синегорской рудно-магматической системы (Южное Приморье): структура, рудогенез, пострудные перестройки. – М.: ВИМС, 2020. – 160 с.
4. Середин В. В., Кременецкий А. А., Трач Г. Н. и др. Новые данные о иттриеворедкоземельных гидротермальных рудах с ураганными концентрациями РЗЭ // Доклады РАН, 2009. – Т. 425. – № 3. – С. 378–383.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПОИСКАМ И ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫМ РАБОТАМ НА УРАН НА ТЕРРИТОРИИ ЮГА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ

А. А. Коковкин

ИТиГ ДВО РАН
kokovkin@itig.as.khb.ru

SUGGESTIONS ON EXPLORATION AND FORECAST-EXPLORATION WORKS ON URANIUM IN THE RUSSIAN FAR EAST SOUTH AREA

A. A. Kokovkin

Institute of Tectonics and Geophysics, Far East Branch, Russian Academy of Sciences
kokovkin@itig.as.khb.ru

The lack of effective exploration works on economic uranium deposits in the Russian Far East South area, despite the fact that its structure is abundant with the complexes specialized for uranium and manifestations of numerous ore genesis epochs, can be explained by a number of reasons. The main reason is that previously used prediction-exploration models (PEM) did not account for specifics of evolvement of the structure of the Russian Far East South area and its poor geological study. In this region, the uranium exploration works have not been conducted for more than 20 years. No researchers in uranium geology are working here now. Under these conditions, we need to establish a large-scale regional project aimed at revising the prospects of the Russian Far East South area for the uranium potential, which would account for the causes of the earlier ineffective uranium exploration. Along with establishing this project, it is reasonable to carry out exploration works in a number of local areas of the deposit related to the Hercynian and Cretaceous epochs of the hydrothermal uranium ore genesis. The suggestions on exploration of the hydrogenic uranium deposits are presented in separate report.

На территории ЮДВР получили развитие пять основных эпох уранового рудогенеза:

Рифейская эпоха, с TR–Th–U и P–Zr–TR–U формациями древних платформ (южный фас Сибирского кратона, Уруша-Ольдойский и Тырканский районы).

Герцинская эпоха, связанная с позднепалеозойской тектоно-магматической активизацией (ТМА) древних жестких блоков Центрально-Азиатского пояса (Буреинский и Ханкайский массивы). В эту эпоху образовано оруденение урановых формаций зон кислотного выщелачивания и зон щелочного метасоматоза, фосфор-урановой формации в карбонатных и фосфороносных породах, фосфор-ванадий-молибден-урановой формации в кремнистых сланцах.

Позднемезозойская эпоха, связанная с позднемеловой ТМА (оруденение Каменушинского района и местрождения Мельгинского блока на Буреинском массиве, Кремнистое месторождение Уруша-Ольдойского района и др.).

Плейстоценовая эпоха, развивавшаяся на завершающей стадии плиоцен-плейстоценовой мантийной активизации, отмеченной проявлениями плато-базальтов в структуре Востока Азии и в глубине континента. Изучена крайне слабо. С ней связано формирование гидротермального, пригодного для подземного выщелачивания (ПВ) уран-полиэлементного оруденения в осадочном чехле и фундаменте мезозойско-кайнозойских впадин (Ханкайский массив, зона сочленения Амуро-Зейской впадины и Сунляо, Северный Сахалин). Оруденение контролируется очагами и зонами низкотемпературного аргиллизитового метасоматоза и разрывной тектоникой.

Плейстоцен-голоценовая эпоха гидрогенного уранового рудогенеза. Связана с развитием окислительного эпигенеза в палеодолинах и зонах трещинной кислородной инфильтрации в специализированных на уран гранитных массивах. Потенциально рудоносна, степень ее изученности минимальна.

Все (известные) сформированные в эти эпохи месторождения – это незначительные по запасам, непромышленные объекты. Исключение – месторождения Каменушинской ВТС. Для региона ЮДВР, значительная часть структуры которого специализирована на уран и несет следы масштабной проработки процессами потенциально продуктивного, полихронного метасоматоза, отсутствие промышленных объектов выглядит довольно странной.

Такое состояние обусловлено тремя основными, взаимосвязанными причинами. Первая заключается в том, что использованные прогнозно-поисковые модели (ППМ) не учитывали геологической специфики окраинно-континентальной структуры ЮДВР. Все действовавшие ППМ были рассчитаны на промышленные аналоги, удаленные от окраинно-континентальной структуры (ОКС) ЮДВР. Но эта структура существенно отличается по характеру своего развития и по современному ее состоянию от глубинной части континента. Действие аналогового подхода, по определению, ограничено ближней зоной. Всем геологам известно, что каждый рудный район и каждое ме-

сторождение существенно различаются. Даже если они сформированы в одну эпоху рудогенеза. Причина такой несхожести - именно в специфике развития рудовмещающей структуры и в ее пострудных перестройках. Главенствующий в прогнозно-поисковых работах аналоговый метод, не учитывающий этой специфики, дает из-за этого системные сбои.

Вторая причина, во многом определившая характер первой – слабая геологическая изученность территории ЮДВР. Практически все ее ППМ создавались на основе государственных геологических карт масштаба 1 : 200000, дополненных иногда специализированными поверхностными поисками того же масштаба (иногда М 1 : 50000) и данными АГСМ-съемок. Исходная геологическая основа всех использованных ППМ – это поверхностная основа. И она, как правило, не была подкреплена опережающей структурной геофизической подготовкой, которая обычно проводилась параллельно поисковым работам.

В процессе поисковых работ прогнозно-поисковая модель менялась, порой до полного пересмотра. Но ее корректировка не успевала за ходом самих поисковых работ. Примером является одна из наиболее изученных в регионе структура Синегорского района В процессе проведения здесь в 1997–84 гг. нагруженного поискового комплекса, с бурением, горными работами и методами МСГ, исходная геологическая карта района была радикально переработаны автором. Ее скорректированный, наполненный новой информацией вариант, позволявший подготовить новые ППМ, был представлен геологам Приморского ПГО и был одобрен ими. Но к тому времени уже было принято решение о закрытии работ в Синегорье. Начался виток конверсии урановой геологии.

Третья причина малой эффективности использованных в ЮДВР ППМ – в этих моделях практически не учитывались пострудные перестройки. Для этого требуется реконструировать ход развития рудовмещающей структуры. И начинать нужно с выделения самых молодых трансформаций новейшего этапа, наиболее выраженных (по определению) в структуре этого региона. Парадоксально, но системно этими реконструкциями в регионе ЮДВР не занимались. Это сложно, поскольку следы пострудных трансформаций теряются на интерферированном (современном) фоне его длительно развивающейся структуры, маскированной к тому же таежными и болотными ландшафтами. Данная ситуация характерна, впрочем и для других регионов.

Автором в последние 20 лет проведены акцентированные на новейший (эоцен-голоценовый) этап исследования ОКС Востока Азии. Они показали масштабность молодой (голоценовой) сдвиг-надвиговой тектоники. Окраинно-континентальная структура этого региона развивается с конца новейшего этапа с выраженной доминантой орогенеза. Ее молодой тектоникой и сопряженной с ней эрозией на поверхность выведены меловые интрузии (в Сихотэ-Алинском орогене плюс к тому и интрузии олигоценового возраста), с уровнем среза до 3 км. Деформированы взбросо-сдвигами и надвигами, выведены из седиментации и эродированы структуры мезозойских и новейших впадин, с амплитудой взброса до $n \times 100$ м. Были взломаны и эродированы плиоцен-плейстценовые плато-базальты. Этим масштабным трансформациям были, соответственно, подвержены и рудные зоны всех эпох рудогенеза, вплоть до зон плейстоценового рудогенеза.

Обозначенные причины неэффективности ППМ дополняло воздействие на поиски эффекта неохватности территории ЮДВР. Как следствие, отсутствие положительных результатов по каждому геологическому заданию, даже после первого года поисковых работ, нередко становилось причинной ухода на новые площади.

К этому необходимо добавить, что периодически проводившиеся сводные работы, ориентированные на оценку ураноносности региона, также ориентировались на аналоговый метод и мало чего добавляли к обозначенным ранее перспективам. Анализ эффективности проведенных ранее работ проводился в этих работах довольно формально.

Напрашивается вывод, что в регионе ЮДВР необходимо провести системный анализ продуктивности проявленных в нем эпох рудогенеза, учитывающий специфику развития их рудовмещающей структуры на до-, син- и пострудном этапах. Для этого необходим крупный междисциплинарный проект с коллективом квалифицированных специалистов по геологии, геофизике, металлогении, по радиогеохимии и новейшей тектонике. В рамках этого регионального проекта могут быть реанимированы известные рудные районы и выделены новые рудоперспективными площади с принципиально новыми прогнозно-поисковыми моделями. Выходы на локальные площади и участки по старой (аналоговой) методике, со старыми ППМ, заранее обречены на провал. Ситуация здесь, однако, осложнена тем, что в регионе практически не осталось геологов-уранщиков, а специалисту-«варягу» для того, чтобы понять специфику этого региона, необходимо время. Исходя из опыта, для освоения каждого нового района даже квалифированному специалисту требуется не менее 3-х лет.

Но уже сейчас, с учетом вышесказанного, в структуре ЮДВР, в дополнение к этому региональному проекту, можно выделить ряд ситуаций, перспективных для поисков гидротермального (докайнозойского) оруденения.

1. **Синегорский район, герцинская эпоха рудогенеза.** Здесь в специализированных на уран девон-карбоновых ВТС необходимо опоисковать основной, не изученный ранее рудолокализующий элемент. Это первый и наиболее контрастный барьер, осадитель урана, действовавший на пути движения восходящего потока рудоносных растворов – граница ВТС-

фундамент. В ходе этих поисков вероятно выявление оруденения и в рудоподводящих структурах фундамента ВТС. Здесь следует заметить, что Раковская ВТС, единственная из Синегорских вулкано-структур заложенная на специализированном гранитном фундаменте, совсем не была захвачена глубинными поисками. Одноименное плейстоценовое урановое месторождение в осадках наложенной на эту ВТС впадины может рассматриваться как вторичный ореол рассеяния герцинского оруденения, локализованного в ней и в ее фундаменте. Ремобилизационная модель плейстоценового оруденения Раковского месторождения представлена автором в работе.

В Синегорских ВТС, выделенных после соответствующей разбраковки, необходимо проведение поисков бурением, с дополнительной опережающей геофизической подготовкой. Вся территория Синегорского района была закрыта комплексом методов структурной геофизики М 1 : 50000. Но ее результат, по причине упомянутой «конверсии» не были учтены выполнявшимися параллельно с ней поисковыми заданиями.

2. **Буреинский район, позднемеловая эпоха рудогенеза.**

Таланджинская площадь (S = 500 км^2) расположена в 25 км западнее Каменушинской ВТС. в зоне Инкоу-Хинганского разлома северо-восточной ориентировки, на пересечении с меридиональными разломами Эхилкан-Ханкайской зоны. Площадь включает одноименную ВТС (120 км^2), выполненную специализированными на уран вулканитами кислого состава и небольшие поля аналогичных вулканитов на ее южном обрамлении. По этой площади с ее специализированным на уран гранитно-метаморфическим фундаментом проведены лишь поверхностные поиски М 1 : 50000. Здесь выявлено 6 рудопроявлений урана с оруденением в зонах аргиллизации и березитизации. Данные рудопроявления, по мнению автора, являются лишь верхней частью зоны рудогенеза. Глубинная (основная ее часть) соответствует, как в ВТС Синегорского разлома, границе раздела вулканиты-фундамент, вместе с рудоподводящими разломами. Здесь необходимы поверхностные поиски М 1 : 10000 и поиски бурением, с опережающей подготовкой АГСМ и структурной геофизикой. Положительные результаты послужат существенной добавкой к урановому урановому ресурсу Каменушинской ВТС, расширив при этом и общие перспективы урагоносности Буреинского района, поскольку его структура насыщена подобными ситуациями.

3. **Удская площадь** (10000 км^2) с крупной линейной радиогеохимической аномалией, одной из самых контрастных на территории ЮДВР. Расположена она на северо-востоке ОКС в зоне северо-восточных разломов Монголо-Охотской системы. Вмещающие породы – метаморфические породы девон-карбонового возраста с признаками позднемеловой ТМА. Площадь практически не изучена. Здесь возможно выявление месторождений с оруденением фосфор-ванадий-молибден-урановой формации в кремнистых сланцах и урановой формации в зонах березитизации. На первой стадии здесь необходимо проведение АГСМ-съемки М 1 : 50000, с прогнозно-поисковыми работами М 1 : 200000.

Предложения по поискам на гидрогенный уран плейстоценовой (эндогенной) эпохи рудогенеза и окислительного рудогенеза представлены в отдельном докладе.

Литература

1. Коковкин А. А. Геодинамическая модель кайнозойского этапа развития континентальной коры юга Дальнего Востока России и уран-полиэлементное рудообразование. Автореферат докт. дисс. – М: РИС ВИМС, 2007. – 50 с. http://vak.ed.gov.ru/announcements/geomin/573/. http://www.dissercat.com/.
2. Коковкин А. А. Парадоксы голоцена и роль неоплейстоцен-голоценового рубежа в развитии Земли // М-лы совещания Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. – М., 1918. – Т. 1. – С. 287–291. ISBN 978-5-89118-762-7.
3. Коковкин А. А. Эволюция Синегорской рудно-магматической системы (Южное Приморье): структура, рудогенез, пострудные перестройки. – М.: ВИМС, 2020. – 160 с.

СПЕЦИФИКА ПЛЕЙСТОЦЕН-ГОЛОЦЕНОВОГО РУДОГЕНЕЗА В МЕЗОЗОЙСКО-КАЙНОЗОЙСКИХ РИФТОГЕНАХ ЮГА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ (ЮДВР) И ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫХ РАБОТ НА ГИДРОГЕННЫЙ УРАН

А. А. Коковкин

ИТиГ ДВО РАН
kokovkin@itig.as.khb.ru

SPECIFICS OF THE PLEISTOCENE-HOLOCENE URANIUM ORE GENESIS IN THE MESOZOIC-CENOZOIC RIFTOGENS OF THE RUSSIAN FAR EAST SOUTH AND THE PROBLEMS OF THE FORECAST-EXPLORATION STUDIES ON HYDROGENIC URANIUM

A. A. Kokovkin

Institute of Tectonics and Geophysics, Far East Branch, Russian Academy of Sciences
Khabarovsk, Russia, kokovkin@itig.as.khb.ru

It is shown that the inefficiency of the forecast-exploration studies on hydrogenic uranium in the Russian Far East South is mainly caused by using the forecast-exploration models that do not account for the specifics of development of the continental margin structure of the region. The structure is rejuvenated in the eastern direction with the gradient at the continental boundary. In the Pliocene, the rejuvenation trend was complicated by mantle activation, which termination phase resulted in the development of the uranium-polyelement hydrothermal ore genesis. The structure was later transformed by strike-slip overthrust tectonics with dominating upthrust (amplitude of up to n × 100 m) and the related erosion (truncation to a few hundred meters). The Pleistocene ore genesis zone was deformed in Mz–Kz–riftogens, and the conditions for the development of the oxidation ore genesis, which is productive for hydrogenic uranium, were disturbed. The recommendations are proposed, which provide developing more reliable forecast-exploration models.

Регион ЮДВР насыщен мезозойско-кайнозойскими впадинами, вложенными в специализированный на уран фундамент. Эти впадины выполнены рыхлыми, обводненными, преимущественно сероцветными угленосными осадками. Регион, в связи с этим, всегда представлялся весьма привлекательным для поисков гидрогенных месторождений урана. Эти поиски предпринимались здесь неоднократно, но ожидаемых результатов до сих пор не принесли. Причина такой неэффективности в том, что использованные прогнозно-поисковые модели (ППМ) (как и ППМ, ориентированные на более древние эпохи рудогенеза) не соответствовали реальному состоянию поисковых объектов. Все ППМ ориентировались на промышленные аналоги гидрогенных месторождений внутренней части континента, связанные с окислительным эпигенезом. Но эти модели не вписывались в специфику окраинно-континентальной структуры (ОКС) ЮДВР. Понимание этого пришло и к автору далеко не сразу.

Первый «заход» на опоискование впадин ЮДВР был предпринят Октябрьской экспедицией в Приморье, в конце 1950-х – начале 1960-х. годов, с ориентировкой на месторождения зон пластового окисления (ЗПО). А. К. Мигутой было опоисковано большинство впадин Ханкайского массива. Но ЗПО, как таковых, не было установлено. Тем не менее, было выявлено около 20 рудопроявлений и несколько сотен аномалий урана, проведена предварительная разведка Раковского уранового месторождения. Генезис этого оруденения представлялся тогда довольно неопределенным.

В 1974–85 гг. Таежным ПГО проведены (также с ориентировкой на зону пластового окисления) поиски на уран в Средне-Амурской, в Амуро-Зейской впадинах и в группе Приханкайских впадин. По Раковскому месторождению запасы урана были наращены на 15 %. Автором, ответственным исполнителем этих работ, было доказано отсутствие в регионе масштабного пластово-окислительного процесса. Но наличие уранового оруденения трещинно-инфильтрационного типа на гранитном обрамлении мезозойско-кайнозойских впадин Ханкайского и Буреинского массивов позволило предположить, что регион ЮДВР может быть продуктивен на паледолинный тип уранового оруденения.

Важным результатом этих работ был вывод о плейстоценовом возрасте и гидротермальной природе проявлений урана, выявленных во впадинах этого региона и о пригодности их для добычи подземным выщелачиванием (ПВ) [1, 3]. На примере Раковского месторождения была разработана мо-

дель этого рудогенеза. В соответствии с ней, формирование уранового оруденения связано с развитием объемных очагов низкотемпературного аргиллизитового метасоматоза. Эти очаги развиваются из активизированных в плейстоцене разломов фундамента впадин. Контроль оруденения тройной – активизированными в плейстоцене разломами, зональностью метасоматоза и проницаемостью осадочного чехла. Его базальный слой, скользящий во времени по борту впадины, раскрыт на проницаемые горизонты внутреннего выполнения впадины. Он объединяет эти горизонты в единую гидродинамическую систему, обеспечивая объемный характер проработки метасоматозом осадочного чехла.

Принципиально важным является то, что по этой модели рудоподводящие разломы одновременно являются и рудолокализующими. В Раковской, Поисковой и Вадимовской впадинах оруденение прослежено единичными скважинами в фундамент – в ситуациях, где оно непосредственно переходит в него из осадочного чехла. Но эти находки, при ориентировке работ на чехол, по сути, случайны. Однако, при таком их случайном характере все контролирующие впадины разломы должны рассматриваться как потенциально рудовмещающие. Следует заметить, что поскольку все контролирующие впадины разломы раскрыты и обводнены, а их субстрат дезинтегрирован, то локализованное в них оруденение, как и руды в проницаемых горизонтах осадочного чехла, пригодно для подземного выщелачивания (ПВ).

На данном этапе работ был установлен полиэлементный характер этого рудогенеза. Наряду с ураном в нем участвовал целый набор других элементов - прежде всего, германий и редкие земли. В Раковской и Павловской впадинах над проработанным метасоматозом базальном горизонтом, в нижних угольных пластах, локализовано два крупных германиевых месторождения.

В 1992–98 гг. Таежным ПГО совместно с ВИМСом (отв. исполнители А. А. Коковкин, С. М. Бакулин) был выполнен региональный проект по оценке перспективности ОКС региона на палеодолинный тип уранового оруденения. В рамках этого междисциплинарного проекта составлена сводка по урановосности региона, по его радиогеохимии, по структуре и литологии мезозойско-кайнозойских впадин, по их металлогении, гидрогеологии и по корам выветривания их фундамента. Выделено 19 рудоперспективных площадей, рекомендованных на проведение прогнозно-поисковых работ М 1 : 200000 [1].

При разработке эволюционной модели ОКС обозначилась главная особенность ее развития, определившая отличие этой структуры от глубинной части континента. Для нее характерно омоложение к востоку всех геологических событий мезозоя-кайнозоя, до градиентного у окраины материка и в зоне перехода континент-океан. В этом направлении омолаживается рифтогенез, орогенез, гранитообразование, связанные с ним магматические и вулканогенные формации, литификация осадков рифтогенов, нефтегазообразование и эндогенный рудогенез.

В 1998–2001 гг по четырем площадям (Тамбовская на юге и юго-востоке Амуро-Зейской впадины; Бысса-Нимаканская в ее северо-восточной части; Эхилканская и Адникан-Амгуньская на Буреинском массиве) Таежной экспедицией была проведена подготовка маршрутами и комплексом профильной геофизики для проведения поисков бурением (отв. исп. А. А. Коковкин). Но данный проект не был завершен из-за ликвидации этой экспедиции.

Последние поиски бурением были проведены в 2018–20 гг Иркутским подразделением УранГео на локальных участках восточного борта Амуро-Зейской впадины и западного борта Средне-Амурской впадины. Работы были ориентированы на ЗПО и палеодолины, с прежним аналоговым подходом. Успеха они не принесли.

Автор с 2001 года занимается системным изучением ОКС Востока Азии в составе ИТиГ ДВО РАН, с акцентом на новейший этап ее развития. За это время исследован характер ее тектоники, рифтогенеза и орогенеза, сейсмотектоники и сопряженных с ними эрозионных процессов. Вместе с тем, продолжено изучение и закономерности новейшей уран-полиэлементной металлогении ЮДВР. В процессе изучения ОКС было установлено, что на нее в конце новейшего этапа наложено два масштабных события. Именно они определили условия развития в ней молодого гидротермального и окислительного эпигенеза, и во многом – современное состояние самой ОКС и ее металлогенической зональности.

1) Плиоцен-среднеплейстоценовая мантийная активизация с развитием плато-базальтов.

2) Резкая активизация орогенеза, сдвиг-надвиговой тектоники и сопряженной с ними эрозии на границе неоплейстоцен-голоцен.

Изучение плейстоценового (эндогенного) уран-полиэлементного рудогенеза, его связи с мантийной активизацией показало, что на региональном уровне он практически не изучен. Но его отдельные проявления отмечены по всей структуре ОКС. Следы этого рудогенеза зафиксированы на севере Сахалина, на севере КНДР, в береговом уступе Желтого моря, на Буреинском и Ханкайском массивах, в Средне-Амурской и Амуро-Зейской впадинах, также и в глубине континента (в Монголии и на Витимском плато). Однако понять закономерности формирования и современного состояния его региональной металлогенической зональности и отдельных его проявлений невозможно без учета эффекта второго события.

Выделить голоценовую активизацию, показать ее масштабность и выраженность в структуре ОКС было само по себе непросто. Традиционной геологической школой принята установка «не замечать» ее. Этот стереотип останавливает исследователя даже

при выделении очевидного, идентифицирующего ее признака. Реакция «да ну, не может быть…», обычная для подобных феноменов, не располагает к этому. Но проведенное автором [2] системное изучение голоценового феномена по структурам Альпийско-Гималайского и Тихоокеанского подвижных поясов показало, что оба эти пояса, а вместе с ними и рассматриваемая структура ЮДВР, насыщены индикаторами голоценовой активизации.

Для ОКС ЮДВР индикаторами голоценовой активизации являются, прежде всего, мезозойские и новейшие впадины. Все они, за малым исключением, взброшены, выведены из седиметации и трансформированы голоценовой сдвиг-надвиговой тектоникой и эрозией. Сейчас пракически все они – реликтовые структуры. У всех этих впадин эрозионный, полого-всхолмленный рельеф. Важно то, что контуры впадин в результате голоценовой эрозии были существенно сокращены. Амплитуда голоценовых взбросов этих впадин достигала многих сотен метров. Следы таких взбросов наблюдались, в частности, на юго-восточном обрамлении Амуро-Зейской впадины. Здесь, на удалении до 100 км к востоку от ее современной границы, сохранились препарированные эрозией локальные останцы меловых и новейших осадков с тектоническими контактами. А ближе к борту препарирована эрозией и деформированная голоценовой тектоникой сеть ее палеодолин.

При этом, в ходе голоценовой активизации вместе с впадинами были трансформированы и зоны плейстоценового рудогенеза. Прецеденты этих трансформаций отмечены в системе Приханкайских впадин (Раковская, Реттиховская, Павловская и др.). В результате, на современном обрамлении многих впадин, где их осадки срезаны эрозией, в обнаженных структурах фундамента сохранились фрагменты нижних частей зон рудогенеза с полиэлементным U–Ge–TR оруденением. Верхние части этих зон сохранились в осадочном чехле (в современном контуре впадин).

В этих условиях для формирования объективной прогнозно-поисковой модели (ППМ), ориентированной на поиски гидрогенных (плейстоценовых эндогенных) уран-полиэлементных месторождений в осадках впадин и в структурах их фундамента необходима реконструкция голоценовых трансформаций с восстановлением контуров впадин на время плейстоценового рудогенеза. Необходимость этого определяется еще и тем, что с данными реконструкциями напрямую связано и формирование ППМ, ориентированных на продуктивный окислительный эпигенез.

Молодость и масштабность голоценовой активизации обусловили специфику окислительного процесса в мезозойско-кайнозойских впадинах и палеодолинах ЮДВР. В их взброшенных и деформированных сдвиг-надвиговой тектоникой структурах голоценовая эрозия развивается исключительно быстро. Она опережает развитие не только пластового, но и поверхностного окисления, которые формируются на эрозионном фронте. Как следствие, несмотря на то, что большинство впадин ЮДВР раскрыты для окислительного эпигенеза, окисление в них, из-за высокой скорости эрозии, практически не развивается. Это хорошо видно на примере упомянутых выше, выведенных на поверхность меловых и новейших осадков юго-восточного борта Амуро-Зейской впадины. Эти рыхлые сероцветные осадки не захвачены даже поверхностным окислением.

В данных обстоятельствах интерес, с поисковой точки зрения, могут представлять лишь крупные палеодолины, минимально трансформированные тектоникой и эрозией. В них еще сохранилась возможность длительного развития продуктивного на уран окислительного эпигенеза. Ситуация, однако, дополнительно усложнена здесь тем, что на фоне доминирующего в голоцене орогенеза отдельные части впадин, вместе с палеодолинами на их бортах, были просажены и заняты современными накопительными ландшафтами. Но восстановительная среда этих ландшафтов блокирует развитие окисления. На продуктивность таких палеодолин можно рассчитывать лишь в том случае, если они были раскрыты для окисления на более ранних (доголоценовых) этапах их развития. Однако, таких прецедентов до сих пор не наблюдалось.

В связи с этим, выделение каждой конкретной, перспективной на уран палеодолины, с разработкой соответствующей ППМ, должно учитывать, кроме известных признаков (оптимальные размеры палеодолины, наличие специализированного фундамента и проницаемого сероцветного выполнения), также и совокупность обозначенных выше факторов. Необходим анализ сведений по деформации палеодолины тектоникой, по характеру ее эрозии, по наличию в ней современных седиметационных ландшафтов и по времени их развития. Для этого требуется реконструкция эволюции палеодолин и вмещающей ее структуры. Существенную помощь здесь должно оказать дешифрирование космофотоснимков и космической радарной съемки соответствующей детальности.

Исходя из изложенного, в ЮДВР необходим региональный проект по оценке перспектив выявления плейстоцен-голоценовых (эндогенных и связанных с окислительным эпигенезом) месторождений, пригодных для ПВ. Он должен предусматривать подготовку эволюционной модели ОКС, акцентированной на плейстоцен-голоценовый этап ее развития, с выделением локальных площадей, и подготовку соответствующих ППМ. Этот проект должен быть скоординирован с предложенным автором региональным проектом по оценке продуктивности на уран более ранних эпох рудогенеза.

Параллельно с региональным проектом целесообразно провести подготовку для поисков бурением по ряду площадей с обозначившимися уже перспективами:

1. Крупная (около 20 км) палеодолина на севере Павловской впадины (Ханкайский массив). Она не изучена бурением, но ее препарированная эрозией структура хорошо выражена на космоснимке. В «приустьевой» части палеодолины, в базальном слое Павловской впадины локализовано Григорьевское рудопроявление урана. Площадь перспективна на выявление уранового месторождения с оруденением палеодолинного типа и/или плейстоценового эндогенного уран-полиэлементного оруденения. Здесь необходимо дешифрирование детальных космоснимков, проведение комплекса профильной геофизической подготовки с микросейсмикой и альфа-трековым методом, радиометрических маршрутов, составление прогнозной карты М 1 : 25000 на геолого-структурной основе.

2. Северо-Сахалинская площадь (26000 км^2) с многочисленными приповерхностными аномалиями радиоактивности, выделенными массовыми поисками при каротаже сейсморазведочных скважин. Вмещающие породы – рыхлые плиоценовые осадки (нутовская свита). На двух локальных участках оруденение вскрыто шурфами. Представлено оно черной сыпью цераліта (метамиктная разность монацита) в цементе песков. Содержание урана – 0,07 %, тория – 0,07 %, TR – более 2 %. На западе площади, в береговом уступе Татарского пролива, в базальтах известны аномалии интенсивностью до 200 мкР/час. На площади необходимо проведение АГСМ-съемки М 1 : 50000 и рекогносцировочных маршрутов, с составлением прогнозной на уран карты М 1 : 200000.

Литература

1. Коковкин А. А. Геодинамическая модель кайнозойского этапа развития континентальной коры юга Дальнего Востока России и уран-полиэлементное рудообразование. Автореферат докт. дисс. – М: РИС ВИМС, 2007. – 50 с. http://vak.ed.gov.ru/announcements/geomin/573/. http://www.dissercat.com/.
2. Коковкин А. А. Парадоксы голоцена и роль неоплейстоцен-голоценового рубежа в развитии Земли // М-лы совещания Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. – М., 1918. – Т. 1. – С. 287–291. ISBN 978-5-89118-762-7.
3. Коковкин А. А. Эволюция Синегорской рудно-магматической системы (Южное Приморье): структура, рудогенез, пострудные перестройки. – М.: ВИМС, 2020. – 160 с.

ПОЗИЦИЯ РЕПЬЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА В РЕГИОНАЛЬНОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ МЕТАСОМАТОЗА, ПОСТРУДНЫЕ ПЕРСТРОЙКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ УРАНОНОСНОСТИ СТРУКТУРЫ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

А. А. Коковкин

ИТиГ ДВО РАН
kokovkin@itig.as.khb.ru

POSITION OF THE REPYEVSKOE URANIUM DEPOSIT IN THE REGIONAL ZONE OF METASOMATISM, POSTRUDE PERSTRUCTIONS AND PROSPECTS OF THE URANIUM RANGE OF THE MIDDLE VOLGA STRUCTURE ABSTRACT

A. A. Kokovkin

Institute of Tectonics and Geophysics, Far East Branch, Russian Academy of Sciences
kokovkin@itig.as.khb.ru

The position of the Rep'evsky uranium-bitumen deposit in the zonality of hydrothermal metasomatism of the modern structure of the Middle Volga Region, and the effect of the post-ore reconstructions on it are examined. The ground for the examination is the model of this structure developed by the author, involving the data on modern tectonics, seismotectonics, metasomatism and the character of erosional processes. According to this model, the deposit is controlled by a large focus of argillisitic quartz-carbonate-bitumen metasomatism (S = 1200 km^2). The focus appears to be a fragment of the regional zonality of metasomatism that formed in the structure of the Volga Region during the Oligocene. In the Holocene, it was upthrust together with the deposit by the Zhigulevsky Dome (ZhD), eroded and exposed by the Volga right-bank scarp on the southern flank of the ZhD for more than 50 km. This focus seems to be promising for exploration of new uranium-bitumen deposits.

Репьевское уран-битумное месторождение [3] расположено на территории Среднего Поволжья, в 5 км западнее Сызрани. Оно приурочено к небольшой линейной купольной структуре, осложнившей южный борт Жигулевского свода (ЖС) на западном его фланге. На месторождении были проведены поисково-оценочные работы Кольцовским ПГО. Здесь представлен ряд соображений, касающихся его структурной позиции, его связи с гидротермальным метасоматозом, пострудных перестроек и перспектив выявления новых, подобных ему объектов.

Рудные залежи Репьевки локализованы в известняках карбона, у границы с рыхлыми песчано-глинистыми осадками юры, в так называемом репьевском горизонте, сложенном кавернозными известняками, нарушенными тектоникой и проработанными (вместе с вмещающими его породами) аргиллизитовым метасоматозом. Для руд месторождения обозначается, таким образом, тройной контроль - разрывной тектоникой, проницаемостью разреза и аргиллизитовым средне-низкотемпературным метасоматозом переменного битум-кварц-карбонатного состава, с гидрослюдой и сульфидами.

Рудная минерализация импрегнационного и прожилково-вкрапленного типов представлена, по данным изучавшей ее В. М. Тюленевой с соавторами [4], двумя ассоциациями. Преобладают руды уран-битумно-сульфидного состава: настуран, коффинит, твердые битумы (кериты), пирит и кальцит. Встречаются также уран-битумно-ванадиевые образования (с фосфатами) – сажистые массы с недиагностируемым минеральным составом. Это, вероятно, результат более позднего преобразования первой ассоциации.

Репьевский горизонт хорошо проницаем и обводнен. Морфология залежей осложнена малоамплитудными субвертикальными нарушениями, группирующимися в «пучки», деформирующими границу раздела «юра-карбон» и сам «репьевский горизонт» с образованием флексур, в которых и локализована основная часть оруденения. «Пучки» – это результат разгрузки напряжений сжатия на контрастной границе раздела массивных известняков карбона с рыхлыми осадками юры. Формирование этих дислокаций обусловило взаимодействие сдвиговых систем Жигулевского и Правобережного сводов на предрудном этапе, в эоцене. На глубине эти «пучки» должны переходить в более контрастно выраженные разрывные структуры, которые являются рудоподводящими и, ввероятно, рудовмещающими. Насыщенность репьевского горизонта дислокациями, его раскрытость и обводненность соответствует характеру сдвиг-надвиговой тектоники, проявленной по всей структуре Поволжья в начале эоцена.

В 2015–16 гг. А. А. Коковкиным было проведено комплексное изучение Поволжской структуры в экспедициях «Гагаринского плавучего Университета» в интервале Камышин-Ульяновск. Были изучены проявления новейшей тектоники, сейсмотектоники, характер эрозионных процессов и процессов гидротер-

мального метасоматоза. Ранее таких исследований здесь не проводилось. Основной объект наблюдений – правобережный абразионный уступ Волги (далее просто Уступ) с цепью его свежих, представительных обнажений высотой до 60 м. По результатам этих исследований была разработана принципиально новая, междисциплинарная эволюционная модель новейшей (эоцен-голоценовой) структуры Поволжья [2]. Разработке этой модели способствовал опыт подобных исследований на Востоке Азии и в других регионах [1]. Минералого-петрографическое изучение представительных образцов метасоматитов выполнило В. М. Тюленевой (ВИМС).

В эоцене, в связи с активизацией орогенеза в Альпийско-Гималайском поясе, в Среднем Поволжье были сформированы два крупных свода – Правобережный и Жигулевский. На левобережье Волги синхронно с ними развивалась и более локальная структура Пугачевского свода. Субстрат, на котором развивались эти своды – многокилометровый чехол рыхлых, в основном, пермско-кайнозойских осадков северо-западной части Прикаспийской впадины, с литифицированными породами ее девон-карбонового фундамента. Своды были заложены в эоцене на северо-западном борту этой впадины – там, где она сочленяется с Восточно-Европейской плитой и ее жестким блоком – Воронежской антеклизой. Правобережный свод (ПС), контролируемый меридиональной системой разломов, наращивался с омоложением к югу, к Каспию. Жигулевский свод (ЖС) контролировался одноименной системой широтных разломов, трассирующихся на космоснимках к востоку, до Сибирского кратона.

В неоплейстоцене северная часть Прикаспийской впадины, выведенная в конце эоцена из седиментации, была активизирована и занята Хвалынским морем, отложившим чехол красноцветных осадков мощностью первые десятки метров, с возрастом 10–30 тыс. лет [5]. На западе Хвалынскую трансгрессию остановила структура Правобережного свода.

В голоцене, в ходе новой более контрастной активизации орогенеза в Альпийско-Гималайском поясе, была активизирована с доминантой взброса вся система разломов Поволжской структуры. Характер голоценовой активизации особенно ярко выражен на Уступе, вскрывшем восточный борт Правобережного свода и оба борта ЖС. Его абразионной системой вскрыты взбросо-сдвиговые дислокации, наложенные, в том числе, и на хвалынские красноцветы. Видимая амплитуда взброса этих красноцветов – до 150 м.

В узле взаимодействия ПС и ЖС контролирующими эти своды сдвиговыми системами и синхронно развивающейся эрозией на поверхность выведены блоки карбонового фундамента, с амплитудой до километра и более. В районе Самарской Луки были взброшены и сняты эрозией перекрывавшие их осадки перми, мезозоя и хвалынские красноцветы. Реликты этих осадков вскрыты Уступом на обоих бортах Жигулевского свода. К западу и востоку от Жигулей фундамент ЖС погружается, а разрез перекрывающих его осадков омолаживается до перми и мезозоя.

На новейшем этапе повсеместное развитие в структуре Поволжья получил средне-низкотемпературный аргиллизитовый метасоматоз. Его проявления наблюдались на всем исследованном интервале, от Камышина до Ульяновска. Вскрытые Уступом, современными оврагами, дорожными врезами и карьерами пермские – кайнозойские осадки насыщены проявлениями метасоматитов переменного состава. Метасоматоз очагового характера, контролируется узлам пересечения новейших разломов субмеридиональной и широтной систем. В эоцене он действовал синхронно с осадкообразованием, а с олигоцена до настоящего времени - как эпигенетический процесс. Состав наблюдавшихся метасоматитов варьирует, в зависимости от уровня эрозионного среза вмещающей структуры. Мофология их весьма разнообразна – здесь получила развитие объемная проработка, штокверково-жильные, линзовидно-пластовые, трубчатые, ветвистые, шаровидные и другие формы.

К югу от Саратова, где разрез осадков Правобережного свода омолаживается до эоцена, а эрозионный срез минимален, преобладают метасоматиты карбонатного, кремнистого и кремнисто-карбонатного состава, местами с гипсом и сульфидами. Эти проявления представляют верхнюю подзону региональной зоны метасоматоза. Севернее Саратова, где структура Правобережного свода более эродирована (возраст его осадков опускается здесь до мезозоя), в метасоматитах увеличивается содержание сульфидов и арсенопирита, гипса, появляются твердые битумы. Эти метасоматиты представляют нижнюю подзону. В голоцене в районе Самарской Луки эта подзона была взброшена структурой ЖС. В апикальной части свода она была полностью эродирована, но сохранилась на его южном борту, на востоке свода и на западном его погружении.

В интервале Саратов-Сызрань Правобережный свод насыщен современными проявлениями жидких битумов. В 70 км северо-западнее Саратова (4 км севернее села Лох), в приосевой части Правобережного свода наблюдалось поверхностное проявление современных битумов с серией небольших грязебитумных грифонов. Поверхность этого проявления полностью лишена растительности. Вода пересекающего его ручья желтая из-за тонкой лимонитовой взвеси. Здесь работают восходящие источники, обогащенные окисляющимся на поверхности закисным железом. По данным рентгено-спектрального анализа пробы, отобранной с поверхности одного из грифонов, материал вулкана характеризуется повышенным содержанием P_2O_5 (0,27 %), S (9,06 %), Cl (0,43 %)

и K_2O (2,43 %). На космоснимке Лохское битумопроявление представляет собой южную часть намного более крупного образования. Можно с большой долей уверенности утверждать, что это поверхностная часть довольно масштабной, активизированной в голоцене углеводородной системы с глубинными нефте-битумными залежами. Признаки современной битуминизации обнаружены в структуре ПС и севернее, вблизи села Черный Затон. Вскрытые здесь Уступом меловые осадки дислоцированы и проработаны кварц-карбонатным метасоматозом с жидкими и твердыми битумами.

Восточнее Самары в апикальной, наиболее эродированной части Жигулевского свода, где голоценовым взбросом на поверхность выведен карбоновый фундамент, эрозией вскрыта самородная (крупнокристаллическая) сера (Водинское месторождение). Неустойчивая в этих условиях сера еще не успела окислиться – это дополнительный индикатор голоценового возраста взброса ЖС. К западу от Самары на высоком южном борту ЖС в известняках карбона обнажено проявление массивного, мелкокристаллического гипса, также не затронутого поверхностным окислением.

А в 15 км западнее проявления гипса (в районе села Ермаково), на погружении Жигулевского свода (на его пологом южном борту) локализовано проявление алунита. Оно вскрыто современным оврагом, вложенным в зону новейшего меридионального разлома, дополнительно активизированного в голоцене. Вмещающие алунит породы – алевролиты нижней перми, проработанные корой выветривания. Сверху они перекрыты реликтовым плащом хвалынских красноцветов. Характер голоценовых дислокаций хорошо виден на более взброшенном восточном борту разлома, препарированном склоновой эрозией. Здесь обнажены белые известняки карбона, деформированные тектоникой до гиганто-брекчии. Заполнитель брекчии – материал хвалынских красноцветов. В тальвеге оврага вскрыты свежие слабо выветрелые алевролиты перми с кварц-алунитовым (с гематитом) штокверком. Наверху этот первичный алунит перераспределен предхвалынской корой выветривания.

Репьевское месторождение локализовано в западной части крупныго очага метасоматоза. Его восточная часть, с проявлениями твердых битумов вскрыта Уступом выше Сызрани на южном борту Жигулевского свода, сложенного известняками гжельского яруса карбона, перекрытыми здесь, как и в районе Репьевки, рыхлыми осадками юры. Битумы отрабатывались заложенными в основании Уступа штольнями. Следы отработки с порталами штолен прослеживаются на 25 км. Очаг этого метасоматоза трассируется вдоль южного борта ЖС, к востоку от Репьевки более чем на 50 км, с выходом, вероятно, и на левобережье Волги. Площадь его составляет не менее 1200 км^2.

На Уступе к востоку от Сызрани в известняках карбона обнажены зоны новейших дислокаций меридиональной и широтной ориентировки мощностью до 250 м, с штокверково-жильными проявлениями переменного битум-кварц-карбонатного состава, с гидрослюдами и сульфидами. Битумы твердые, керит-антраксолитового ряда. Их прожилки наложены (с брекчированием) на кварц и карбонат и, в свою очередь, пересекаются прожилками лимонитизированного сидерита. По данным рентгено-спектрального анализа трех геохимических проб, выполненного в лаборатории ВИМСа, битум-кварц-карбонатные метасоматиты характеризуются повышенными концентрациями (%): F (0,55), P_2O_5 (10), S (15), K_2O (3,38), CaO (32), Y (0,0978), Ba (0,04), La (0,038), Ce (0,011), Pr (0,012), Nd (0,070), Sm (0,012), Yb (0,0014).

По составу эти метасоматиты идентичны метасоматитам Репьевского месторождения. Судя по всему, вертикальный размах сформировавшего этот очаг метасоматоза сопоставим с амплитудой взброса Жигулей и составлял не менее 3–5 км.

Выраженная связь Репьевского месторождения с метасоматозом указывает на возможность выявления в контуре его очага и других месторождений уран-битумного типа. Оруденение, подобно Репьевке, может быть локализовано как в проницаемых горизонтах на границе карбон-юра, так и в разрывных (крутых и пологих) структурах новейшего (эоцен-олигоценового) возраста. Площадь с этим очагом целесообразно закрыть АГСМ-съемкой и комплексом структурной геофизики 1 : 50000 (S = 1600 км^2), с маршрутным опоискованием, картированием эпигенетических изменений и проявлений новейшей тектоники, с оценкой пострудного эрозионного среза. Работы должны сопровождаться реконструкцией вмещающей очаг геологической структуры, с выделением до-, син- и пострудных трансформаций. В результате должна быть составлена прогнозная на уран карта на структурно-геологической основе, выделением локальных участков, перспективных на выявление месторождений.

Литература

1. Коковкин А. А. Эволюция новейшей окраинно-континентальной структуры Намибии и структура-антипод Востока Азии. Опыт междисциплинарного исследования на синергетической основе. – Саратов: Приволжская книжная палата, 2014. – 188 с.
2. Коковкин А. А., Иванов А. В., Тюленева В. М., Яшков. И. А. Тектоника, сейсмотектоника и гидро-

термальный метасоматоз в новейшей структуре Волжского (Саратовско-Камышинского) Правобережья: новые данные. // Отечественная геология, 2018. – № 6. – С. 51–66.
3. Машковцев Г. А. Константинов А. К., Мигута А. К., Шумилин М. В, Щеточкин В. Н. Уран российских недр. Научное издание ФГУП ВИМС, 2010. – 855 с.
4. Тюленева В. М.,Комарова Г. В.,Пеньков В. Ф., Голева Р. В. Стратиформное урано-битумно-сульфидное месторождение в карбонатных породах верхнего карбона Среднего Поволжья // Редкометалльно-урановое рудообразование в осадочных породах. – М.: Наука, 1995. – С. 127–144.
5. Янина Т. А. Неоплейстоцен Понто-Каспия: биостратиграфия, палеогеография, корреляция. – М: Географический ф-т МГУ, 2012. – 264 с.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПЛОЩАДКИ РОССИЙСКОГО ПУНКТА ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ (ПЕРВЫЙ БЛИН МОЖЕТ БЫТЬ КОМОМ)

В. Н. Комлев

Апатиты, Россия

GEOLOGICAL STUDY OF THE SITE OF THE RUSSIAN DEPOSIT OF RADIOACTIVE WASTE (THE FIRST STEP IS ALWAYS THE HARDEST)

V. N. Komlev

Apatity, Russia

A fragment of the discussion on the problem of radioactive waste disposal in Russia is given. In particular, highly active and long-lived waste on the banks of the Yenisei. The mining and geological situation of the deep disposal site for radioactive waste is considered according to the information of the Federal State Budgetary Institution (FSBI) “Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences” and the author. The drawbacks of the geological study of the future disposal site are noted (prospecting and appraisal stages, OJSC “Krasnoyarsk Mining and Geological Company”). An assumption was made about the need for state re-examination of the primary and interpreted geological information on the Yeniseisky site. It may also be necessary to cancel the documents of the Federal Agency for Subsoil Use (Rosnedra), which justify and permit the construction and operation of a facility for the disposal of radioactive waste here. The recommendation of the FSBI “State Commission on Mineral Reserves” to carry out the exploratory stage of geological study of this area was supported.

Предисловие

Россия достаточно поспешно планирует создать в Красноярском крае в пределах закрытого административного территориального образования (ЗАТО) Железногорск на участке «Енисейский» первый и единственный национальный/федеральный (минимум, если не учитывать возможность реализации некоторых тенденций [1]) шахтного типа ПГЗРО – пункт глубинного/геологического захоронения радиоактивных отходов (РАО) первого и второго классов опасности (твердых). Речь идет об объекте, у которого по мировым представлениям перспектива на миллион лет экологических тревог далеко не местного значения и на сотни миллиардов долларов затрат только в обозримом будущем. Его вместимость будет несопоставимой с реализуемыми возможностями ПГЗРО Швеции и Финляндии (нынешние лидеры). По принципу условной паритетности военных и гражданских ядерных программ СССР/России и США объем российских отходов предположительно и укрупненно можно оценивать лишь в сравнении с американскими. А единый российский ПГЗРО – с совокупностью двух (Waste Isolation Pilot Plant – WIPP и Yucca Mountain nuclear waste repository) американских в пустыне поближе к периферии (как и китайский Beishan в пустыне Гоби). Понятно, что такой гигантский по задумке российский объект в центре страны на берегу Енисея не может не привлекать к себе разностороннего внимания.

Ряд отечественных разрешительных документов уже готов. Все они датируются 2016 годом и выборочно базируются на выводах, не реализуя рекомендации, одного ключевого геологического документа - протокола ГКЗ № 4523 от 03-02-2016 [2]. Первого такого рода документа в России, в нетрадиционной для Роснедр сфере деятельности, без предшествующего опыта, на фоне давно отработанной регламентации

во многом противоположных захоронению действий по относительно недолгой добыче полезных ископаемых, при доминировании традиций основной деятельности. В такой ситуации абсолютная новизна задачи не страхует от появления ошибок в оформлении базового документа для ПГЗРО.

Важная особенность: все документы по результатам поисковой и оценочной стадий (разведочной стадии не было, как, впрочем, и полноценной поисковой!) геологического изучения оформлены для ПГЗРО, а не для подземной исследовательской лаборатории – ПИЛ, идея которой стала ныне главной темой обсуждения Росатомом работ на участке «Енисейский». Не пригодность участка по природным условиям и не ПГЗРО, а уникальный научный проект – ПИЛ!

Должны ли российские ПГЗРО и ПИЛ соответствовать международным и национальным нормам? Их авторы и сторонники утверждают: должны и соответствуют. Но дело в том, что участок «Енисейский», горный массив которого является основным элементом этих природно-техногенных объектов, уже в самом начале процесса «проверки документов», еще до оценок технологических аспектов намечаемой деятельности, только лишь с точки зрения рационального использования и охраны недр (например, Закона о недрах и сопутствующих документов), видимо, не годится ни для ПГЗРО, ни для ПИЛ (раздел XXXIII [3, 4]). Замена объекта обсуждения оказалась неэффективной. И она не добавляет идее Красноярского ПГЗРО ни надежности, ни безопасности.

К сожалению, при этом участок «Енисейский» вряд ли можно назвать и подлинно выбранным (как принято согласно международной методологии) местом, итогом комплексной, по ряду критериев, оценки/сравнения российских геологических альтернатив. Он – фрагмент поддерживающей инфраструктуры и результат стремления к обеспечению конкурентных преимуществ Росатома (на каком рынке, если в России внутренний рынок ядерных услуг отсутствует?!) при реализации «здесь и сейчас» высшего корпоративного приоритета – замкнутого ядерного топливного цикла с переработкой отработавшего ядерного топлива [5].

В настоящей статье отсутствие пропущенного первого и необходимого этапа (выбора), а также разведки, значимость ПИЛ не обсуждаются. Это было сделано ранее (например, [6]). Кроме того, считаем, что нуждается в усилении доказательство необходимости и безопасности как мотивации работ на участке «Енисейский» – технологического приоритета Росатома относительно гражданского топлива, так и жесткой (именно в Железногорске, «под одной крышей») связи по месту площадок комплекса переработки (+ другие) и пока федерального (!) ПГЗРО.

Тема настоящей статьи локальна. В журнале «Радиоактивные отходы» (№ 4, 2020) опубликованы две статьи [7, 8], посвященные одному из важных видов работ – геологическому изучению бурением с поверхности уже конкретного, хотя бы и назначенного безальтернативного участка. Это шаг в сторону реального дела. Как давно и многократно отмечали в публикациях разные авторы, определят в конечном итоге судьбу ПГЗРО именно горно-геологическая обстановка места, слово специалистов по недрам, а также соответствие/несоответствие слов и реальности отечественным юридическим и научно-техническим нормам, международному опыту, охваченному и еще не охваченному нормированием. Журнал «Радиоактивные отходы» издается Институтом проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), почти все соавторы рассмотренных статей – сотрудники этого института.

Суть ситуации

I. Гупало В. С. и др. [7].

Констатация фактов авторами.

Стр. 30. До создания первого комплекса подземных горных выработок (ПИЛ, первой очереди ПГЗРО) исследования геологической среды возможно выполнить с поверхности, применяя скважинные методы.

Стр. 30. Буровые работы на участке «Енисейский» выполнены в периоды 2003–2010 и 2010–2014 гг.

Стр. 31. Необходима детализация гидрогеологических и гидрохимических условий горного массива в пределах участка.

Стр. 31. Необходимая детализация с помощью имеющихся скважин гипотетически возможна, но только при их восстановлении/ремонте, изменении конструкции и нетрадиционном подходе к реконструкции с ориентацией на геологические особенности участка и специфику будущего ПГЗРО.

Стр. 31. Иные подходы к обустройству скважин будут негативно отражаться на результатах исследований, создадут дополнительные риски нарушения изолирующих свойств массива.

Стр. 31. Гидрогеологические условия сложны по всему вскрытому разрезу. Необходим значительный объем поинтервальных исследований с дискретностью 1–5 м.

Стр. 33. Предусмотрены бурение новых скважин и новые исследования гидрогеологических условий согласно геологическому проекту на разведочную стадию изучения массива.

Стр. 35. Требование восстановления естественного потока подземных вод.

Стр. 37. «Концепция многослойного сложного тампонирования»: читай – из-за многослойной проводимости массива.

II. Тесля В.Г., Расторгуев А. В. [8].

Констатация фактов авторами.

Стр. 58. В ближайшие годы начнется строительство ПИЛ. В связи с этим приоритетной задачей яв-

ляется организация мониторинга недр с помощью скважин для получения необходимых параметров массива в ненарушенном состоянии.

Стр. 67. В связи с началом в ближайшие годы строительства ПИЛ, особую актуальность приобретает задача организации мониторинга недр в ближней зоне сооружения.

Стр. 58. Необходимы поинтервальное детальное исследование разрезов с дискретностью 1–2 м, новое оборудование и новая методика интерпретации.

Стр. 58. Неоднородность и блоковая структура гидрогеологических свойств массива.

Стр. 59. Критика гидрогеологических и гидрохимических результатов поисковой и оценочной стадий исследований с точки зрения надежности обоснования сверхдолговременной (практически вечной) безопасности захоронения РАО. Постановка задач нового поинтервального опробования.

Стр. 60–67. Описание шведско-финского опыта изучения массивов для ПГЗРО до глубины чуть более 1000 м как необходимого для адаптации к условиям участка «Енисейский».

Стр. 67–68. Варианты необходимой в 2021 г. и позже корректировки работ на участке «Енисейский» с учетом зарубежного опыта.

Стр. 68. Необходимость применения новых методов на участке «Енисейский» для разработки прогнозных моделей при обосновании безопасности ПГЗРО.

III. Дополнительная к авторской двух статей информация по теме.

1. В списках литературы рассмотренных статей уже присутствует Закон о недрах, что является признаком возможной (и неизбежной [4, 9]) переориентации ИБРАЭ от мифических [6] в направлении достойных взглядов и профильных (российских и зарубежных) юридических и научно-технических документов - основы работы по теме ПГЗРО. В частности, переориентации от замалчивания в направлении четкого исполнения рекомендаций документов ГКЗ или аргументированного доказательства их неуместности.

2. Справедливо обращено внимание на насущную необходимость корректировки работ, важность и потенциал опережающих скважинных исследований до создания капитальных горных выработок (в том числе, ПИЛ), на необходимость детализации гидрогеологических условий массива с помощью новых исследований и обновленного фонда скважин.

3. ИБРАЭ опрометчиво и необоснованно продолжает настаивать на принадлежности находящегося на территории ЗАТО Железногорск участка «Енисейский» Нижнеканскому гранитоидному массиву, на присутствии в названии массива гнейсов участка «Енисейский» термина «Нижнеканский». Эта негативная настойчивость имеет важные причины и будет иметь важные следствия.

4. 2003 год, а не 1992, как часто утверждают другие специалисты ИБРАЭ, более точно отражает начало реальных работ по геологическому изучению участка «Енисейский» Атамановского кряжа Саян (коему принадлежит промышленная площадка Горнохимического комбината, ГХК, в ЗАТО Железногорск).

5. ИБРАЭ в статьях уже представлен и новыми специалистами, имеющими профильное образование, опыт реальной работы с горными массивами и подземными сооружениями, знания о работах по захоронению РАО за рубежом. Тем самым, в дело привнесен элемент необходимого базового горно-геологического профессионализма, слабо присутствовавший прежде.

6. Вновь сложность массива в пределах участка «Енисейский», неверная направленность и плохое качество его предшествующего изучения убедительно зафиксированы представителями научного руководителя – ИБРАЭ. Ранее с четкой позицией необходимости разведочной стадии до проектирования и строительства нестандартного объекта и очень впечатляюще – статьей [10]). Это частично коррелирует с замечаниями и рекомендациями протокола [2].

В пределах той же промышленной площадки ГХК [11] не без причин, видимо, 60 лет комплексно и неустанно следят за состоянием массива (объект-аналог, см. протокол ГКЗ, В. А. Караулов и А. А. Верчеба, [2]) специалисты службы горно-геологического мониторинга [12]. В частности, для обеспечения безопасности подземного комплекса служба выполняет 2850 высокоточных маркшейдерских измерений в год, более 5000 измерений температурных режимов горных пород междукамерных целиков, порядка 700 измерений массива горных пород с помощью глубинных реперов, 2840 контрольных измерений деформаций горной крепи, 1500 замеров параметров проявления грунтовых вод [13]. Кто миллион лет будет так контролировать состояние ПГЗРО, осушать и ремонтировать его?

Удивительно, но одновременно ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (ФГУП «НО РАО») в очередной раз без ссылок на какие-либо исследования геологического объекта в целом (а не отдельных лабораторных образцов) «информирует» [14, 15] общество о другом – сверхпрочном, чрезвычайно устойчивом и монолитном Нижнеканском массиве гнейсов участка «Енисейский» без воды, сравнивая его по мегапаскалям и химическому составу вдобавок с грунтами/гранитами второго (!), настоящего Нижнеканского массива – Южно-Енисейского кряжа. Напомним, что во всех российских и зарубежных научно-технических коалициях ФГУП «НО РАО» (кроме двух последних – с Томским государственным университетом и МИФИ, [16, 17]) его постоянным партнером является ИБРАЭ. Мнение научного руководителя не доходит до ответственного исполнителя?

Вместе с фиксированием сложности и плохой изученности массива, у, преимущественно горняков, ИБРАЭ не обозначена пока четкая готовность принять рекомендации ГКЗ о разведочной, до начала горных работ, стадии изучения участка и сопряженных территорий на путях разгрузки подземных вод, не приведена ссылка на упомянутый, предположительно подготовленный, проект нового геологического изучения (надо бы его обсудить, чтобы через несколько лет не повторилась сегодняшняя ситуация). Но присутствуют [18] намеки на некую «синхронизацию мероприятий программы исследований массива с проходческими работами при создании ПИЛ» – опасная двойственность и настойчивое несогласие с регулятором/распорядителем недр.

7. ИБРАЭ продолжает 1) вольно (в том числе, при оценке качества изучения массива) оперировать термином «глубокие скважины» разного заложения и проходки, не указывая государственную классификацию, которой этот термин введен, и 2) не объяснять причины выбора тех или иных конкретных значений глубины «глубоких» скважин. Однако, стоит заметить, что 1) здесь и поблизости в регионе вообще никогда не было глубокого бурения и 2) самые «глубокие» скважины участка «Енисейский» (700 м) мельче применявшихся при разведке площадок гипотетических ПГЗРО ПО «Маяк» (более 1000 м) и принадлежавших Печенге («SAMPO-Pechenga-I», около 2000 м, не говоря уже о Кольской сверхглубокой скважине).

Кроме того, закладывая ПГЗРО в регионе без истории глубокого бурения (то есть, без надежных знаний о глубинной геологической обстановке) на миллион лет, надо бы 1) во избежание неприятных сюрпризов знать, что представляет собой геологическая среда под ним (следовательно, на участке должна быть пробурена некая опорная/параметрическая скважина по аналогии с нефтегазовой отраслью) и 2) доказать (согласно рекомендациям МАГАТЭ), что под ним и по соседству в недрах ничего путного для развития следующих этапов цивилизации нет. Это требует дополнительно единичных скважин до глубин в первые километры [19], как, например, настаивают искать нефть в кристаллических породах те геологи, кто не отбрасывает [20, 21] теорию ее абиогенного происхождения.

8. В условиях проходки и эксплуатации выработок ПИЛ восстановления естественного потока подземных вод не будет. То есть, его нельзя исследовать на этапе ПИЛ.

9. Сохранность открытых стволов имеющихся скважин (в том числе, как индикатор качества массива), тем более, – после их разбуривания с увеличением диаметра, вызывает вопросы.

10. Важно не наличие по всему вскрытому разрезу (необходимо знание ситуации и глубже) блоков с относительно низкой водопроницаемостью, а наличие по их границам зон повышенной водопроницаемости (мощностью от 0,2 до 13 м). В условиях сверхдолговременного автономного функционирования ПГЗРО с прогревом пород и подземных вод до 100 °С теплом отходов, при благоприятных для образования трещин растягивающих напряжениях в «горе» и ее «потряхивании» время от времени отголосками землетрясений в соседних регионах именно сеть таких границ будет определять безусловное присутствие и динамику воды во вмещающем РАО массиве – главный фактор выноса радиоактивности в окружающую среду.

11. Похоже, на монолитность массива для ПГЗРО шахтного типа нельзя рассчитывать в принципе. Север (Заангарье, даже Южно-Енисейская площадь [22]) и юг (Саяны) региона характерны провинциями месторождений золота и урана, генетически обусловленными событиями геодинамической истории территории. Кроме того, красноярский геолог Н. Ф. Васильев считает [23]: «Грандиозность позднемеловых движений можно считать доказанной и надежда, что гнейсы в районе участка «Енисейский» ими не затронуты – явный самообман. К тому же в течение кайнозоя… были новые тектонические подвижки, о чем свидетельствуют разломы... Подновления разломов происходят иногда и сейчас (судя по землетрясениям с интервалом в несколько десятков-первых сотен лет). Обустраивать в такой ситуации долговременный могильник радиоактивных отходов в данном месте – преступление перед будущими поколениями». Кстати, по Н. Ф. Васильеву, породы целевого интервала для ПГЗРО выходят на поверхность вне Железногорска. Вероятно, они могут быть дополнительно и независимо изучены там (в частности, по методологии, аналогичной выявлению на сопряженной территории объемного разуплотнения метаморфитов зоны Главного Саянского разлома [24, 25]). Результатом движений может быть, видимо, и надежно задокументированный сброс размером не менее 200 м на глубине приблизительно 500 м в пределах соседнего полигона «Северный» [26, 27]. Выявленные на предварительных стадиях геологического изучения следы разнонаправленных тектонических подвижек с потерей исходной консолидации гнейсов непосредственно на участке «Енисейский» рассмотрены в разделе XLI [4].

12. Полезно смотреть хотя бы на шаг вперед. Нельзя при геологическом изучении массива полностью игнорировать уже сегодняшнее развитие технологий настоящего глубинного/геологического захоронения твердых РАО в скважинах [9 – п. 3.3, 28–31]. Необходима разведка на глубины 1,5–2,0 км минимум.

Вместо заключения. Обобщающее серьезное предположение

Дополнительно к ранее опубликованным разными авторами критике «выбора» и отсутствия разведки, негативным оценкам геологической среды

участка «Енисейский» и сомнениям в первоочередной необходимости здесь ПИЛ не следует ли из новых рассмотренных горно-геологических материалов ИБРАЭ, что:

1) выполненные на поисковой и оценочной стадиях геологического изучения буровые работы, гидрогеологические и гидрохимические исследования в методическом и инженерном исполнении ошибочны, так как не были ориентированы на учет принципиальных природных особенностей участка «Енисейский», специфики будущего ПГЗРО, зарубежного опыта и технологических перспектив поистине глубинного захоронения высокоактивных РАО с помощью скважин;

2) ставшие базой стратегически важных (в частности, федеральных программ) и проектных решений результаты поисковой и оценочной стадий неудачны и ненадежны, необходима государственная (по статье 29 Закона о недрах) повторная экспертиза имеющейся первичной и интерпретированной геологической информации по участку «Енисейский»;

3) оформленные в 2016 году по результатам поисковой и оценочной стадий изучения участка «Енисейский», обосновывающие с горно-геологических позиций строительство здесь ПГЗРО и захоронение РАО базовые документы Роснедр (прежде всего, краеугольный - протокол ГКЗ № 4523 от 03-02-2016), видимо, должны быть распорядителем недр аннулированы в первую очередь;

4) давние (с 2012 г.), неоднократные и настойчивые, но не выполненные (что могло способствовать оформлению разрешительных документов на основе неадекватной геологической информации) рекомендации ГКЗ о разведочной, до начала горных работ, стадии надежного изучения массива с окрестностями в 2019–2020 годах безусловно актуализированы (это обстоятельство в силу особой государственной важности создаваемого объекта далее никто не вправе игнорировать) и могут быть дополнительно наполнены новым содержанием (в том числе, в части исследований соответственно рассмотренным статьям – на новых и обновленных скважинах с поверхности, новыми методами и оборудованием, а также оценкой возможности захоронения РАО скважинным методом на глубины 1–2 км);

5) выполнение рекомендаций ГКЗ о полноценной буровой с поверхности разведке участка «Енисейский» и путей разгрузки его подземных вод стало первоочередной задачей?

Послесловие

Если пользование недрами с захоронением в них РАО наивысшей опасности и создание ПГЗРО люди с профессией «понимать скалы» позиционируют как абсолютно безопасное дело - «стройка века и на века» [серия видеофильмов о сотрудниках и профессиях ФГУП «НО РАО», 32, 33], то, все же и как минимум, 1) при обосновании площадки желательно не отступать от научно-технических и социальных международных канонов, 2) необходимо выполнять требования регулирующих документов разного уровня, 3) а геология дела (она и только она может гарантировать заявленную безопасную масштабность) должна быть изучена полно и безупречно.

Если же, в итоге значительных бюджетных затрат, с геологией/экологией участка «Енисейский» окончательно не повезет, то приведенные в предыдущем абзаце пожелание и требования в принципе надо бы примерять к другим территориям. Научный руководитель не исключает, «что спустя несколько десятков лет мы вынуждены будем признать, что ошибались, и начнем искать другое место» [34, Л. А. Большов].

Теоретически, примерять лучше с коррективами соответственно российским условиям. В частности, помня и о новой задаче Росатома – надежной изоляции нерадиоактивных опасных отходов первого и второго классов. В частности, учитывая тенденцию расширения набора услуг горной индустрии, соответствующих потребностям общества. В частности, не пренебрегая потенциалом выводимых из эксплуатации горнорудных объектов и выработанных пространств (включая хорошую изученность геологической ситуации), возможностью (в том числе, заблаговременно) создания в них изолированных камер и целенаправленного изменения физических свойств участка недр в целях адаптации к изменяющимся условиям (в том числе, условиям подземных сооружений, используемых по иному назначению после отработки запасов полезного ископаемого). Создавая с применением принципов и достижений комбинированной геотехнологии [35, 36] комбинированные системы захоронения РАО. На основе различного сочетания готовых крупных подземных рудников и карьеров с размещаемыми (естественно, со штатными инженерными барьерами обычных ПГЗРО) дополнительно из них/их пространства во вмещающем массиве и в них РАО-модулями (часть готовой выработки, система отдельных новых небольших выработок, скважины разного направления и заложения – большого диаметра или промежуточного по технологии Deep Isolation) [9 – пункты 2.5 и 4.1, раздел VI; 37–40].

Литература

1. Возможность изменения статуса ПГЗРО: https://uranbator.ru/59452/, http://www.atomic-energy.ru/interviews/2018/03/15/84085, http://www.atomic-energy.ru/interviews/2017/01/16/71717, https://www.dw.com/ru/где-хранить-отходы-с-белорусской-аэс-или-игра-в-русскую-

рулетку/a-39715049, http://bezrao.ru/n/3438, http://bezrao.ru/n/4186, http://bezrao.ru/n/4193 и п. 3.6 https://proza.ru/2018/02/13/284, п. 12 https://proza.ru/2018/11/07/898, http://bezrao.ru/n/4183.
2. Протокол ГКЗ № 4523 от 03-02-2016 (https://yadi.sk/i/Nbvvx8zrv58tlQ).
3. Комлев В. Н. Глубинное захоронение радиоактивных отходов: требования и реальность // Маркшейдерский вестник, 2020. – № 6. – С. 61.
4. Комлев В. Н. Закон о недрах и радиационная безопасность страны (https://proza.ru/2020/09/20/903).
5. Крюков О. В. Краткий комментарий к утверждению «Стратегии создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов» // Радиоактивные отходы, 2018. – № 2 (3). – С. 16–17. (http://en.ibrae.ac.ru/docs/Radwaste_Journal_2(3)18/016_017_Kryukov.pdf).
6. Комлев В. Н. Глубинный ядерный могильник (https://proza.ru/2020/05/10/812).
7. Гупало В. С., Казаков К. С., Коновалов В. Ю., Неуважаев Г. Д., Озерский Д. А. Анализ подходов к консервации и ликвидации скважин на участке недр «Енисейский» (Красноярский край, Нижнеканский массив) // Радиоактивные отходы, 2020. – № 4 (13). – С. 30–41. (http://radwaste-journal.ru/journal/25/).
8. Тесля В. Г., Расторгуев А. В. Особенности планирования детального изучения гидродинамических и гидрохимических свойств участка «Енисейский» Нижнеканского массива // Радиоактивные отходы, 2020. – № 4 (13). – С. 58–70. (http://radwaste-journal.ru/journal/25/).
9. Комлев В. Н. Радиоактивные отходы как повод подумать о вечном (https://proza.ru/2018/02/13/284).
10. Морозов О. А., Расторгуев А. В., Неуважаев Г. Д. Оценка состояния геологической среды участка «Енисейский» (Красноярский край) // Радиоактивные отходы, 2019. – № 4 (9). – С. 46–62. (http://radwaste-journal.ru/journal/19/).
11. Служба горно-геологического мониторинга ЗРТ ГХК отметила 60-летний юбилей (https://sibghk.ru/news/9390-sluzhba-gorno-geologicheskogo-monitoringa-zrt-gkhk-otmetila-60-letnij-yubilej.html).
12. Горному надзору – 60! (https://vk.com/@sib_ghk-gornynadzor60).
13. Исполнилось 60 лет службе горно-геологического мониторинга ГХК (https://www.atomic-energy.ru/news/2020/12/25/110138).
14. Надежность реализуемого объекта (http://nkmlab.ru/o-porode/).
15. Лабораторию под Железногорском спрячут в гнейсах (http://bezrao.ru/n/4159).
16. Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами подписал соглашение о сотрудничестве с НИЯУ МИФИ (https://www.atomic-energy.ru/news/2020/12/30/110302).
17. Томские ученые займутся НКМ-лабораторией в Красноярском крае (http://bezrao.ru/n/4156).
18. Гупало В. С., Казаков К. С., Коновалов В. Ю, Демин А. В. О синхронизации мероприятий программы исследований массива с проходческими работами при создании подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве // Горный журнал, 2020. – № 3. – С. 83–88.
19. Комлева Е. В. Нефть или ядерные отходы (http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=4698).
20. Иванов К. С. О возможной максимальной глубине нахождения месторождений нефти // Известия Уральского государственного горного университета, 2018. – Вып. 4 (52). – С. 41–49. (https://iuggu.ru/download/2018-4-52-Ivanov.pdf).
21. Иванов С. Н., Иванов К. С. (2018) Реологическая модель строения земной коры (модель третьего поколения) // Литосфера, 2018. – Вып. 18 (4). – С. 500–519. (https://www.researchgate.net/publication/327984547_Rheological_model_of_Earth's_crust_model_of_third_generation).
22. И лучшей судьбы не хотим / под ред. Л. П. Рихванова, В. А. Домаренко. – Томск : Изд во ТПУ, 2010. – 348 с. (https://portal.tpu.ru/files/conferences/radioactivity/65.pdf).
23. Васильев Н. Ф. Отзыв на статью // Уральский геологический журнал, 2021. – № 1. – С. 58–59. (https://cloud.mail.ru/public/cCGf/BSx8efnsQ).
24. Тверитинова Т. Ю. Парагенетический анализ зеркал скольжения рифейских метаморфитов Гурбейского рудного поля (Восточный Саян) // Российская тектонофизика. Апатиты. Сб. статей, 2019. – С. 150–165. (http://geoksc.apatity.ru/images/stories/Print/tecto2019.pdf).
25. Васильев Н. Ю., Мострюков А. О., Петров В. А. и др. Оценка вероятности рудолокализующей роли объемного разуплотнения горных пород в развитии Гурбейского месторождения золота (Восточный Саян) // Российская тектонофизика. Апатиты. Сб. статей, 2019. – С. 270–293. (http://geoksc.apatity.ru/images/stories/Print/tecto2019.pdf).
26. Баринов А. С., Ткаченко А. В., Спешилов С. Л. Глубинная закачка жидких радиоактивных отходов (http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/Prezentetion_31_10_2013/Speshilov.pdf).
27. Гунин В. И. Прогноз миграции жидких радиоактивных отходов при глубинном захоронении на полигоне «Северный» (http://hge.spbu.ru/images/Gynin_shk.pdf).

28. Deep Isolation предлагает перспективную технологию изоляции РАО в скважинах для возможной будущей малой АЭС в Эстонии. (https://www.atomic-energy.ru/news/2021/02/02/111073).
29. Американская компания Deep Isolation предлагает новый способ геологического захоронения ВАО и ОЯТ в глубоких буровых скважинах. (https://www.atomic-energy.ru/news/2019/11/14/99092).
30. Комлев В. Н. Плач по Енисейско-Атамановскому ядерному погосту – раздел 2 (https://proza.ru/2017/09/21/801).
31. A new approach to radioactive waste self-burial using high penetrating radiation (ИБРАЭ РАН) // Journal of Nuclear Science and Technology. Или «Самозахоронение радиоактивных отходов: могильники не нужны?» (http://bezrao.ru/n/1751).
32. ФГУП «НО РАО». Стройка века и на века (https://www.youtube.com/watch?v=O7IqPOKm2f4&feature=emb_logo). А также http://norao.ru/press/multimedia/2495/, http://www.norao.ru/press/media/2361/ и стр. 5 - http://www.norao.ru/upload/iblock/de8/de8ebbd38c81572931444b76dafb2db7.pdf.
33. Атомные хроники (https://uranbator.ru/59710/).
34. Представители Российской академии наук ответили на вопросы о подземной лаборатории (https://www.atomic-energy.ru/news/2020/07/16/105480).
35. Каплунов Д. Р. Комбинированная геотехнология как основа перехода к новому технологическому укладу недропользования // Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу. Магнитогорск. Сб. статей, 2019. – С. 14–19. (http://www.cgt.magtu.ru/downloads/results/2019-sbornik-statei.pdf).
36. Рыльникова М. В. Проблемы и перспективные направления перехода к новому технологическому укладу горнорудных предприятий России // Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу. Магнитогорск. Сб. статей. 2019. - С. 20-30 (http://www.cgt.magtu.ru/downloads/results/2019-sbornik-statei.pdf).
37. Комлева Е. В., Самаров В. Н., Непомнящий В. З. Захоронение радиоактивных отходов: системный анализ // Минералогия и геохимия ландшафта. Чита / Улан-Удэ. Сб. статей, 2016. – С. 362–366. (http://inrec.sbras.ru/files/labs/0/1475457493.pdf).
38. Комлев В. Н. Ядерно-геологический уникум будущего // Минералогия и геохимия ландшафта. Чита / Улан-Удэ. Сб. статей, 2016. – С. 357–361. (http://inrec.sbras.ru/files/labs/0/1475457493.pdf).
39. Комлева Е. В., Самаров В. Н., Непомнящий В. З. Комбинированная система захоронения ядерных отходов // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. – Томск. Сб. статей. – С. 325–334. (https://portal.tpu.ru/files/conferences/radioactivity/proceedings/2016.pdf).
40. Самаров В. Н., Непомнящий В. З., Комлева Е. В. Подземное хранение/захоронение ОЯТ/РАО: новый путь // Труды второй научно-практической конференции «Экологическая безопасность АЭС». – Калининград, 20–21 октября 2015 г. – Изд-во «Аксиос», Калининград, 2015. – С. 135–148 или // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Материалы международной научно-практической конференции, часть VIII. – Воронеж, 12 ноября 2015 г. – Воронеж, 2016. – С. 5–31.

К ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОМУ ОБОСНОВАНИЮ ПОДЗЕМНОГО ОБЪЕКТА ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

В. Н. Комлев

Апатиты, Россия

TO MINING AND GEOLOGICAL VALIDATION OF THE UNDERGROUND OBJECT OF THE FINAL STAGE OF THE NUCLEAR FUEL CYCLE

V. N. Komlev

Apatity, Russia

The geological conditions of the Russian site for deep burial of radioactive waste near the Yenisei are considered. Not only isolated within the boundaries of a given site, as was the case before. But also taking into account more ambitious factors: tectonics of lithospheric plates, properties of a number of functionally similar sites in transitional conditions (Baltic–Yenisei–Pacific Ocean), zoning of the local adjacent territory by mineral resources, the presence of other disposal facilities near the site. In such a semantic connection, it is proposed to study at the exploration stage the main engineering-geological parameter of the rock mass for safety - the state of the underground hydrosphere. The need reliable regulatory and legal framework was noted. Based on the results of the initial stages of work on the deep disposal site for radioactive waste, shortcomings in the application and implementation of legislation and technical standards were identified. A proposal has been formulated for a legal examination of documents prepared for the Yeniseisky site.

Предисловие

Настоящая статья, как оценочное профессиональное суждение автора для понимания долговременного будущего, посвящена анализу опубликованной в открытых источниках информации по теме захоронения особо опасных радиоактивных отходов (РАО) в России.

В мировой практике использования ядерной энергии выделяют заключительную стадию ядерного топливного цикла (ЯТЦ), которую реализуют по одному из двух вариантов: с переработкой отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) или без нее. Важно, что оба варианта в части подземного строительства приводят к принципиально неразличимым подземным объектам глубинного/геологического захоронения либо отходов высокой активности (ВАО) и долгоживущих от переработки ОЯТ, либо непосредственно (прямое захоронение) ОЯТ ([1], с. 8).

Россия пока предпочитает основную часть ОЯТ перерабатывать и планирует создать в Красноярском крае, на участке «Енисейский», в пределах ЗАТО Железногорск, на промышленной территории ФГУП «Горно-химический комбинат» (ГХК) национальный шахтного типа ПГЗРО (архейские гнейсы, на глубине 450–550 м) – пункт глубинного захоронения РАО 1 и 2 классов опасности, твердых. Речь идет об объекте, у которого по международным представлениям перспектива на миллион лет экологических тревог и на сотни миллиардов долларов затрат только в обозримом будущем. По принципу условной паритетности военных и гражданских ядерных программ СССР/России и США объем российских РАО предположительно можно оценивать лишь в сравнении с американскими. А российский ПГЗРО в центре страны – с совокупностью двух (WIPP и Yucca Mountain) американских в приграничной (как и китайский Beishan) пустыне.

Основные черты ситуации

1. Законодательство и технические нормы

Связанные с любым местом размещения аспекты, прежде всего, безопасности федерального ПГЗРО принципиально нуждаются в надежном доказательстве на базе законодательства, норм и правил в области использования и охраны недр. Естественно, что должна быть уверенность в правильности/надежности самой базы – сформированной подборки регулирующих документов. В связи с этим, каждый из подготовленных, обычно в разное время и разными исполнителями (в том числе, разных ведомств), обосновывающих ПГЗРО материалов, по части законов и технических норм, целесообразно, видимо, тестировать. Используя разработанный внешними экспертами перечень необходимых для контроля регулирующих документов и их разделов/пунктов. Тестировать последовательно и порознь по факторам: ОБОЗНАЧЕННЫЕ ИСПОЛНИТЕЛЯМИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛИРУЮЩИЕ ДОКУМЕНТЫ (в первую очередь, так как заведомое неприменение важных регулирующих документов/ошибочные ориентиры/ущербность выбранной для процедуры обоснования нормативно-правовой базы практически неизбежно порождают нарушения) и ИСПОЛНЕНИЕ ЭТИХ ДОКУМЕНТОВ.

К сожалению, при создании ПГЗРО присутствуют, похоже, непрофессиональная, несвязная, не-

полная и во многом неадекватная горно-геологическая трактовка истории, будущего и объемов работ, идентификации и свойств массива пород, некоторых других важных позиций, а также далеко не в полном объеме применение регулирующих документов (их исполнение и соответствие результатов нормам также далеки от безупречных), недостаточная открытость экономических показателей, принятых разрешительных документов, геологических материалов по участку «Енисейский» [2].

Например, предписано (Закон № 190-ФЗ от 11 июля 2011 г. «Об обращении с радиоактивными отходами…», статья 12, п. 2), что захоронение твердых высокоактивных долгоживущих и твердых среднеактивных долгоживущих радиоактивных отходов осуществляется в пунктах глубинного захоронения РАО, обеспечивающих локализацию таких отходов в соответствии с Законом о недрах. Стало быть, «в соответствии с Законом о недрах» относится и к Железногорску. Кстати, Закон о недрах рассматривал нормы захоронения РАО в рамках проблемы регулирования отношений при использовании недр в целях, не связанных с добычей полезных ископаемых, уже до и вне указаний Закона № 190-ФЗ. Поэтому, как только сложное многоэтапное обращение с особой опасности РАО доходит до захоронения, как только функцией создаваемого объекта объявляется обоснование (наука) или реализация (промышленность) захоронения этих РАО – главенствующая роль и необходимость неукоснительного соблюдения переходят к Закону о недрах.

Не все причастные к проблеме об этом помнят. В «Стратегическом мастер-плане исследований в обоснование безопасности ПГЗРО в Нижнеканском массиве» для «строительства ПГЗРО и создаваемой «параллельно» с ним ПИЛ (подземной исследовательской лаборатории)» Закон о недрах не обозначен/отсутствует в качестве ориентира «в рамках горизонта планирования 2070 г.» [3]. Как и в препринте «Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние» [4]. В как бы основополагающем (выпущен позже начала работ и оформления основных разрешений) документе «Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов» Закон о недрах не упоминается (раздел 2), зато объявляется вопреки Закону, что «создаваемые… сооружения ПИЛ … предназначены для захоронения… РАО классов 1 и 2» (раздел 4) [5]. Закон о недрах, по мнению специалистов стратегического планирования захоронения РАО (А. А. Ковальчук, слайд 2), к основе их решений не относится [6]. В условиях действия лицензии Ростехнадзора ГН-01,02-304-3318 (п. 2, [7]) не прописано (по крайней мере, напрямую) обязательное выполнение Закона о недрах. В. А. Караулов (ОАО «Красноярская горно-геологическая компания») в выводах приложения 3 протокола ГКЗ – ФБУ «Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых» (с. 36, [8]) не указывает соответствие условий участка «Енисейский» Закону о недрах.

В 2015 г. ФБУ «Институт проблем безопасного развития атомной энергетики» (ИБРАЭ РАН) отмечал ([9], предисловие, с. 7), что до 2011 г. (участок «Енисейский» был уже запущен в работу, – В. К.) в России отсутствовали правовые требования по захоронению РАО. Это не соответствует действительности: уже действовали, например, Закон о недрах (1992 г.), НП-050-03 «Размещение ядерных установок ядерного топливного цикла (ЯУ ЯТЦ). Основные критерии и требования по обеспечению безопасности» (2003 г.) и НП-055-04 «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности» (2004 г.). Неточности про Закон о недрах и федеральные НП, видимо, воспроизведены не один раз ([10]: введение, с. 6; глава 2; разделы 2.1, 2.3; список литературы; трансляция статьи 12 Закона № 190-ФЗ относительно ВАО без важного указания на Закон о недрах, с. 57).

При выборе и экспертизе площадки и района ПГЗРО никем пока не задействованы федеральные нормы и правила НП-050-03, п. 1.1 которых напрямую их применение предписывает для такого случая. Хотя в перечне «Нормативные документы» на сайте ФГУП «НО РАО» (Национального оператора по обращению с радиоактивными отходами) НП-050-03 присутствуют, а Свидетельством Госкорпорации «Росатом» от 07.03.2012 № ГК-С008 ФГУП «НО РАО» было признано организацией, пригодной эксплуатировать ядерные установки (см. Приложение и Материалы обоснования лицензии, МОЛ, на размещение и сооружение..., том 1, с. 13 [11]). Если ПГЗРО не является ЯУ ЯТЦ, то какие эксплуатируемые ФГУП «НО РАО» сооружения [12] ими являются?

Труднопонимаем лицензируемый вид деятельности лицензии ГН-01,02-304-3318 (которая должна быть документом конкретных и однозначных действий в рамках строго определенной одной стадии пользования недрами, а также строго определенных объемов и типов РАО, а не основанием для опережающих волюнтаристских рассуждений о странных вариантах). Нужно еще доказать, что витиеватая (изобретено комплексное пользование недрами: воедино сведены наука, а также хранение, захоронение и ненормативная «окончательная изоляция» РАО!) формулировка вида деятельности в этой лицензии и МОЛ [7, 11] не противоречит терминологии и сути Закона о недрах, НП-055-14 (которые заменили НП-055-04), Закона о лицензировании и НП-050-03. Терминологии МАГАТЭ ([13], ядерная установка nuclear facility, с. 284, п. 3) эта формулировка вряд ли соответствует.

Даже в материалах к ФЦП ЯРБ-2 (Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года»), дополнительно к массе анало-

гичных публикаций в СМИ, представитель ФГУП «НО РАО» излагает историю вопроса и суть лицензируемого вида деятельности, мягко говоря, лукаво [14]. Достаточно сказать, что к 2000 г. (моменту возникновения лишь идеи участка «Енисейский») были не только найдены, но и изучены площадки на Новой Земле и территории ПО «Маяк» (ВНИПИпромтехнологии), Кольском полуострове (Горный институт Кольского НЦ РАН), сформировано надежное научное направление поиска площадок такого ранга в пределах урановых месторождений (ИГЕМ РАН), вышло Распоряжение правительства России № 1576-р от 27.08.92 (подготовлено Институтом динамики геосфер и Горным институтом Кольского НЦ РАН) о создании ПИЛ на Кольском полуострове.

Для сравнения и правильного/полного понимания ситуации: в материалах лицензии Роснедр КРР 16117 ЗД от 22.07.16 (со странным сроком действия), хотя (вопреки правилам) и не обозначены выдавшие/согласовавшие разрешение на пользование земельным участком органы, а она сама по состоянию на 15.04.21 отсутствует (?!) на сайте ФГУП «НО РАО», в части лицензируемого вида деятельности четко и однозначно записано: «захоронение радиоактивных отходов в глубоких горизонтах», участок «Енисейский», никаких других вариантов нет [15].

Общим итогом перечисленных административно-процессуальных нарушений/системных ошибок/тотальной забывчивости/странной ментальности авторов Енисейского проекта можно, видимо, назвать фактическое неприменение (автоматически – невыполнение) статьи 12 (п. 2) Закона № 190-ФЗ. Что, одновременно, обусловило несоответствие многих реалий создания ПГЗРО горно-геологическим нормам Закона о недрах и связанных с ним документов.

2. Ограничения промышленной территории ГХК

Вблизи площадки ПГЗРО уже имеются разные, ядерного топливного цикла, объекты долговременного размещения (хранение и захоронение) РАО и ОЯТ, комплекс переработки ОЯТ и другие в составе ядерно-космического кластера. Завершают захоронение промышленных реакторов ГХК по способу «на месте» и эксплуатируют полигон «Северный» (юрские осадочные пласты-коллекторы во впадине скального фундамента, захоронение жидких РАО). Документом НП-050-03 предусмотрен, соответственно этому факту, «учет наличия в районе размещения и на площадке ЯУ ЯТЦ других действующих, сооружаемых и проектируемых объектов использования атомной энергии, зданий, относящихся к категории взрывопожарной и пожарной опасности, объектов, содержащих токсичные и коррозионно-активные вещества, а также транспортных путей, аварии на которых могут оказывать воздействие на ЯУ ЯТЦ» (п. 2.1 и 4.2.1). Предусмотрены также «ограничения техногенного воздействия на ЯУ ЯТЦ действующих ядерных установок, расположенных в районе размещения и на площадке ЯУ ЯТЦ» (п. 2.5).

Рисунки страниц 27, 29, 30, 45, 47, 50, 194 [16] и публичных МОЛ (2015, 2020 и 2021 годов) для других соседствующих объектов дают обобщенную (более полную, нежели лишь в МОЛ-2015 только для пункта захоронения РАО) ситуационную картину промышленной территории ГХК, площадки ПГЗРО и сопряженных территорий (административные границы, горный и земельный отводы, геоморфология, геология). Промышленная территория ГХК (гнейсовый «остров») зажата между Енисеем и угленосными (и, скорей всего, обводненными) образованиями юры (долина притока Енисея Большая Тель – долина Черского). От площадки ПГЗРО (блок 37) до Енисея – 4, 5 км, до блока 38 (юрские отложения в составе долины Черского, по А.Ю. Озерскому [17] – наличие водонасыщенных угленосных месторождений) – 2 км.

Эта промтерритория – место уже существующих наземных и подземных объектов, возможное взаимовлияние которых необходимо учитывать. Ее ресурс для размещения сейчас новых объектов ограничен или вообще исчерпан. Современный славный подземный комплекс ГХК (если говорить о интегральных свойствах горы – зона техногенного разуплотнения гнейсов, гигантские объемы вынутой скальной породы [18]), как ни печально (после вывода из эксплуатации, нет вечных производств), – будущие каналы сбора воды и «естественных» водотоков, которые не улучшат и без того сложную в контексте ПГЗРО гидрогеологию соседнего массива. Два крупных подземных объекта (подземные пустоты и потревоженный горный массив): не будет ли негативное воздействие друг на друга и на породный целик между ними уже на стадии строительства ПГЗРО? С юга чередой, практически впритык, – Железногорск, Сосновоборск и Красноярск. Подземного пространства для надежного маневра выработками ПГЗРО в назначенном варианте (при горно-геологических осложнениях или желаемом наращивании объемов захоронения РАО/строительстве новых очередей объекта), похоже, нет.

Информация к размышлению о будущем Железногорска: не полностью раскрытая всего лишь шестидесятилетняя (не миллион лет!) история постепенно разраставшегося ядерного кластера в Сосновом Бору - необходимы новые законодательные нормы и инструменты для обеспечения ядерной и социально-экологической безопасности объектов [19].

3. Геологические ограничения участка и района

Участок «Енисейский» принадлежит Атамановскому кряжу Саян – тектоническому узлу Западно-Сибирской плиты, Сибирской платформы и Алтае-Саянской орогенической области. Русло и берега Енисея,

маркирующего глобальную континентальную неоднородность/глобальный геологический переход, не будут миллион лет безразличными к динамике земной коры, наложенной на динамику реки. В пределах той же промышленной территории комплексно следят за состоянием горного массива объекта-аналога (см. протокол ГКЗ, В. А. Караулов и А. А. Верчеба [8]).

Массив участка «Енисейский» сложен. Особое внимание при его изучении и эксплуатации должно быть уделено флюидному режиму, влиянию разломно-блоковой структуры земной коры на состояние подземной гидросферы. Важно не только наличие в массиве блоков с относительно низкой водопроницаемостью, но и наличие по их границам зон повышенной водопроницаемости (мощностью 0,2–13 м). В условиях масштабных горных работ и последующего автономного функционирования многозвенного ПГЗРО с прогревом пород и подземных вод до 100–150 градусов [8, 20, 21], при благоприятных для образования трещин растягивающих напряжениях в горе и ее «потряхивании» отголосками землетрясений в соседних регионах, именно сеть таких границ будет определять безусловное присутствие и динамику воды в массиве и горных выработках с РАО – главный фактор выноса радиоактивности.

На исходную/природную монолитность пород ПГЗРО трудно рассчитывать в принципе, исходя из представлений о процессах в земной коре. Север (Заангарье) и юг (Саяны) региона – провинции месторождений золота и урана, генетически обусловленные геодинамической историей территории. Кроме того, «Грандиозность позднемеловых движений можно считать доказанной и надежда, что гнейсы в районе участка «Енисейский» ими не затронуты – явный самообман. К тому же в течение кайнозоя… были новые… подвижки, о чем свидетельствуют разломы... Подновления разломов происходят иногда и сейчас», породы целевого интервала для ПГЗРО выходят на поверхность вне участка «Енисейский» [22]. Они могут быть независимо изучены там. Результатом движений является и сброс размером не менее 200 м на глубине 500 м полигона «Северный» (с. 20, поперечный геологический разрез ПГЗ ЖРО полигон «Северный», [23]). Следы разнонаправленных подвижек с потерей консолидации гнейсов на участке «Енисейский» и пример непрекращающегося поступления через целевой интервал воды массива в скважину отмечены в разделе XLI [21].

Для полигона «Северный», вмещающие пласты-коллекторы скальные породы которого и участка «Енисейский» однотипны, не исключена возможность гидрологической связи поверхностных вод с областью разгрузки загрязненных подземных горизонтов [24]. Эти же породы средней трещиноватости, вмещающие один из подземных объектов ГХК, содержат жильные включения, немногочисленные (мощностью до 0,5 м) зоны рассланцевания и дробления. Однако имеется и зона дробления мощностью до 40 м, а также мощная зона рассланцевания [25]. Утверждают важное обстоятельство: достоверные исторические и современные инструментальные данные о сейсмичности этого района отсутствуют [26].

Анализ изучения участка «Енисейский» выявил целый ряд существенных пробелов и неопределенностей в информации о геологической среде, которая необходима, согласно существующим нормативным документам [27–31]. Например, глубокие скважины были пройдены за пределами структурного тектонического блока, в котором запланировано размещение ПГЗРО. Отсутствует описание керна скважин, нет достоверной геологической карты земной поверхности масштаба 1 : 2000. Кроме этого, часть экспериментального материала, в частности, данных геофизического изучения участка, была утеряна и т. д. [31].

Район участка «Енисейский» относится к зоне активного орогенеза, т. е. процесс его формирования как горного сооружения еще не закончен. Поэтому «подходящие» гидрогеологические условия и характеристики в таком блоке, существующие на момент начала строительства ПГЗРО, не могут гарантироваться на весь проектируемый срок его эксплуатации. За длительный период геодинамические процессы способны кардинально изменить гидрогеологический режим в геологической среде, но наибольшую угрозу представляет вероятность тектонической деструкции структурно-тектонических блоков. Участок «Енисейский» располагается на западной границе Нижнеканского гранитоидного массива и вмещающих его докембрийских толщ гнейсов. Точнее (рис. 2, [29]) – полностью в гнейсах вблизи границы с гранитами. Такие зоны экзоконтактов магматических тел, как правило, отличаются повышенной трещиноватостью и структурной неоднородностью.

Тектоническая мотивация выбора участка «Енисейский до конца не обоснована: разломы на данной территории в настоящее время являются активными, скорости относительных вертикальных движений и зоны динамического влияния активных разломов, слабо изученные, сравнительно с нормами, возможно, велики [27–31]. Согласно НП-055-14 (п. 53), породный массив должен быть однородной структуры и низкой трещиноватости; целесообразно размещение площадки в районах, не испытывающих интенсивные тектонические движения.

И еще. «На участке выделено два блока – 37 и 38. Но 38-й отвергли из-за наличия водонасыщенных угленосных месторождений» [17]. Впервые применительно к участку «Енисейский» дали повод задуматься о возможном опасном соседстве (природные вода и метан с наложенным радиолизом от РАО?). Пласты угля повышенной водопроницаемости (наряду с другими недостатками) ранее фиксировали вблизи полигона «Северный» [32].

Юрские отложения Западно-Сибирского плитного комплекса вторгаются на сопряженную терри-

торию достаточно близко от площадки ПГЗРО в виде широкой долины Черского. К возможности проявлений угля на участке «Енисейский» и в окрестностях (на путях питания/разгрузки подземных вод) с разных позиций (полезные ископаемые, подземные пожары, геомеханика, гидрогеология) необходимо относиться очень внимательно. Это ведь промышленная территория ГХК в контурах Канско-Ачинского угольного бассейна, Приенисейского горнопромышленного района [33]. И соседние с ней районы Красноярского края (Сухобузимский, Березовский, Емельяновский) – часть угленосной (с проявлениями урана) провинции [34, табл. 25 и 27]. А статус ЗАТО вряд ли предполагал проведение здесь ранее изысканий по части полезных ископаемых. Возможно, по этой причине зафиксировано мнение в протоколе ГКЗ [8], что на участке «Енисейский» полезные ископаемые отсутствуют. Механизм появления юрских отложений, с которыми связаны проявления углей, в пределах ЗАТО Железногорск объясняют нам карты МОЛ и статья Р. М. Лобацкой [16, 35].

Месторождения угля с водой – весомое основание для отказа от площадки/участка ПГЗРО, а не только от отдельного блока! В протоколе ГКЗ [8] информация о углях не замечена. Необходима, видимо, ревизия представленных на экспертизу геологических данных и дальнейшее изучение массива на стадии детальной разведки до начала горных работ.

Создание российского ПГЗРО и соответствующее пользование недрами позиционируют как абсолютно безопасное дело – «стройка века и на века» [36]. Такая позиция – результат ошибочных взглядов, сформированных ранее: «Главной гарантией является гидрогеологическая характеристика горной породы, которая образовалась в архей-протерозойский период развития Земли (от 2500 до 541 ± 1 млн лет назад). За это время разрушению подверглись только первые 30 метров пород массива (и стали доступны для проникновения поверхностных вод). По прогнозам вода с поверхности попадет в зону размещения отходов не ранее, чем через 15 миллионов лет. Срок потенциальной опасности объекта оценивается в 2 миллиона лет. Геологическая среда является основным барьером по обеспечению экологической безопасности. Зона размещения объекта находится в горных породах (водонепроницаемых с застойным режимом трещинно-поровых вод). Движение подземных вод носит нисходящий характер и не выходит на поверхность» [37].

Однако, в последние годы представления о геологических условиях участка «Енисейский» и их соответствии существующим нормам, с учетом требований Закона о недрах, коренным образом меняются [20, 21, 38, 39].

4. Взгляд за пределы участка «Енисейский», территории ГХК и района работ

Российский ПГЗРО – природно-техногенная генерирующая энергию геосистема сложного внутриконтинентального перехода, входящая в эффективный водосборный бассейн Енисея. А если это будет прототипом/надеждой для дальнейшего развития идеи (в каком направлении?) за рубежом? В настоящее время сброс жидких РАО Фукусимы в океан все более приобретает черты плановой неизбежной практики. И ураганы самовольно моют территорию. Но здесь ждут и много твердых РАО [40].

При демонтаже/выводе из эксплуатации ядерных объектов Японии, Республики Корея и КНДР (серьезный рынок полного цикла услуг в части ядерных технологий «бэк-энд») где-то будут хоронить значительные объемы образующихся при этом РАО. Где? Если в национальном варианте, то фактически – в еще более сложной переходной зоне «суша-море». Других территорий у этих стран нет. Для такой переходной зоны были и российские предложения: научные и управленческие [41, 42]. Этот вариант, конечно, не будет аналогом Балтики, где побережье и дно (граниты) осваивают для ПГЗРО Швеция и Финляндия. И, скорей всего, потребуется обоснование или обоснованный запрет (например, во имя защиты общего Тихого океана) при, вероятно, внимательном постоянном сравнении с потенцией амбициозного (конкурентные преимущества [5] и возможность изменения статуса ПГЗРО [43]) Енисейского проекта. Правда, в том числе, и при сравнении относительно механизма триггерной активизации «спящих» негативных факторов под воздействием деформационных тектонических волн от удаленных сильных землетрясений [44].

Гнейсы глобальной (плита-платформа) и локальной (древние гнейсы и относительно молодая интрузия гранитов вблизи мощных еще более молодых юрских осадков) переходных зон, в контуре угольного бассейна/провинции месторождений полезных ископаемых, в центре страны, вблизи крупной реки и города-миллионника Красноярска (а не в приграничной пустыне, как в США и Китае)! А есть ли вообще подобное в мировой практике выбора площадок для крупных захоронений РАО наивысшей опасности? Автор настоящей статьи не знает таких примеров.

ПГЗРО – вечность в рамках жизни человечества. Но пока концепция его создания и реальные дела вряд ли учитывают процессы даже ближайших ста лет. Прогнозы долговременной обеспеченности углеводородами (традиционные нефть и газ, неорганическая/глубинная нефть, газогидраты), новые энергетические технологии (на основе возобновляемых источников, термоядерные и другие), экологические трудности переработки ОЯТ, принцип нераспространения – все это и, возможно, другое могут

достаточно быстро обернуться ненужностью/невозможностью массовой переработки ОЯТ и общемировой потребностью его прямого захоронения (и сейчас уже значимого). Соответственно, требования к ПГЗРО резко повысятся.

Послесловие

При создании ПГЗРО на всех этапах работ безусловным и обязательным является применение и исполнение статьи 12 (п. 2) Закона № 190-ФЗ ОБ ОБРАЩЕНИИ С РАО.

Многие аспекты безопасности федерального пункта захоронения радиоактивных отходов нуждаются в дополнительном надежном доказательстве на базе разведочной стадии геологического изучения площадки, а также законодательства, норм и правил в области использования и охраны недр. Эти мысли никем не отрицаются, но и не порождают, к сожалению, адекватного действия по их реализации.

При утверждении «стройка века и на века» [36] геология дела (главный гарант масштабной безопасности) должна быть изучена полно и безупречно. Этот этап работ уж совсем не должен сопровождаться комплексом нарушений, как предшествующий [45]. Ведь в ИБРАЭ РАН (научное руководство Енисейским проектом) не исключают, «что спустя несколько десятков лет мы вынуждены будем… искать другое место» [46]. Хотя, например, комиссия по экологии Общественного совета Госкорпорации «Росатом» вообще не видит какие-либо работы по Красноярскому ПГЗРО приоритетными в 2021 году [47].

Материалы выбора, изучения и обоснования района и площадки размещения ПГЗРО (геологические задания и проекты на выполнение поисковой и оценочной стадий изучения участка «Енисейский», планируемое геологическое задание на разведочную стадию, геологические отчеты по работам предварительных стадий, протоколы ГКЗ по рассмотрению работ, прежде всего, № 4523 от 03-02-2016), документ «Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов», проект ПГЗРО, лицензии на изучение массива участка «Енисейский» с земной поверхности и изнутри (из ПИЛ), создание ПГЗРО и захоронение РАО, как отражающие все отдельные и важные этапы пользования недрами, должны для повышения безопасности неукоснительно соответствовать ЗАКОНУ О НЕДРАХ (с сопутствующими документами), НП-055-14, ЗАКОНУ О ЛИЦЕНЗИРОВАНИИ и, возможно, НП-050-03, которыми в дело давно введены географо-горно-геологические критерии, по факту недостаточно применявшиеся до сих пор, а также научному подходу к решению проблемы и отобранным временем лучшим образцам международного опыта (см. [2, 20, 21]).

Целесообразна не только геологическая (как предлагалось в [38, 39] и других публикациях), но отдельно и правовая экспертиза (исследование документов, их анализ на соответствие формы и содержания действующему законодательству РФ, как в настоящий момент, так и ретроспективе) всего набора перечисленных выше документов. Возможно, в свете Приказа Генпрокурора РФ И. В. Краснова «Об организации прокурорского надзора за исполнением законодательства в экологической сфере» (письмо № 198 от 15.04.2021).

Полезно, вероятно, выйти из ситуации сложной тесноты, отказаться от идеи «под одной крышей», найти для федерального (!) ПГЗРО другую территорию/площадку – разгрузить ЗАТО Железногорск и промышленную территорию ГХК («фундамент»). Это может быть модернизацией планов ради сохранения главных смыслов идеи крупнейшего ПГЗРО на территории России и главных объектов ГХК.

Приложение

О возможной принадлежности ПГЗРО к объектам ядерного топливного цикла и применимости дополнительных требований к району и площадке его размещения

ВОПРОСЫ:

1. Имеет ли по факту ПГЗРО участка «Енисейский» статус ядерной установки, сооружения, комплекса ЯТЦ?

2. Распространяется ли на ПГЗРО участка «Енисейский» действие документа НП-050-03?

НП-050-03. Размещение ядерных установок ядерного топливного цикла. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. Действующий документ

Настоящие федеральные нормы и правила устанавливают основные критерии и требования по обеспечению безопасности к районам размещения и площадкам ядерных установок ядерного топливного цикла.

1.1. Настоящий нормативный документ распространяется на ЯУ ЯТЦ – сооружения, комплексы, установки для производства и переработки ядерного топлива и ядерных материалов, включая установки по конверсии плутония оружейного качества, производству плутонийсодержащего топлива, обращению со свежим и отработавшим плутонийсодержащим топливом и образующимися при этом радиоактивными отходами, за исключением объектов, добывающих уран.

Проекция положений НП-050-03 на захоронение РАО в ЗАТО Железногорск

1. Захоронение РАО является завершающей стадией обращения с этими отходами.

2. Действующие и планируемые пункты захоронения РАО (ПГЗРО ПУГРов, ПГЗРО на участке «Енисей-

ский» и полигон «Северный») предназначены для захоронения РАО от деятельности ГХК по обращению с ОЯТ, включая переработку.

3. Для этих пунктов захоронения РАО выполняются исследования и необходимы Заключения по ядерной безопасности их функционирования (например, ПГЗРО участка «Енисейский» [48, 49], полигон «Северный» [50]). И даже для РАО 3 и 4 классов Заключения по ядерной безопасности необходимы [51].

При этом (Техническое задание ФГУП «НО РАО» в [48]) разработка Заключения по ядерной безопасности на проект ПГЗРО для класса 1 регламентирована требованиями п. 8.3, 9.1.5–9.1.7 стандарта СТО 95 12001–2016 «Основные правила ядерной безопасности при производстве, использовании, переработке, хранении и транспортировании ядерных делящихся материалов (ПБЯ-06-00-2016)» и пунктом 4.15 федеральных норм и правил НП-063-05 «Правила ядерной безопасности для объектов ядерного топливного цикла» А Заключение по ядерной безопасности должно соответствовать требованиям СТО 95 12001- 2016 (ПБЯ-06-00-2016), НП-063-05, НП-069-14, НП-093-14 и НП-055-14.

То есть, в данном случае ПГЗРО (даже и уже по НП-055-14 «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности», соответственно ТЗ ФГУП «НО РАО») и другие пункты захоронения РАО, технологические спутники ГХК, отнесены к ядерным сооружениям, комплексам и установкам ЯТЦ.

Примечательно, что в создании НП-050-03 принимали участие сотрудники ФГБУН «Геофизический центр РАН», работающие с 2005 г. на промышленной территории ГХК и сопряженных площадях по тематике геодинамической безопасности как ПГЗРО, так и ядерно-опасных объектов ГХК [27].

Для пунктов захоронения РАО оценку ядерной безопасности регламентируют также федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов» (НП-100-17) [52].

4. В Перечне нормативных документов на сайте ФГУП «НО РАО» обозначены [53]:

Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла. НП-016-05 (ОПБ ОЯТЦ);

Основные правила учета и контроля ядерных материалов НП-030-12;

Положение о порядке расследования и учета нарушений в работе объектов ядерного топливного цикла. НП-047-11. Ростехнадзор, 2011;

Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации ядерных установок ядерного топливного цикла. НП-057-04. Ростехнадзор, 2004;

Требования к содержанию плана мероприятий по защите персонала в случае аварии на предприятии ядерного цикла. НП-077-06. Ростехнадзор, 2006;

Положение о порядке объявления аварийной готовности, аварийной обстановки и оперативной передачи информации в случае радиационно опасных ситуаций на предприятиях ядерного топливного цикла. НП-078-06. Ростехнадзор, 2006;

Размещение ядерных установок ядерного топливного цикла. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. НП-050-03. Госатомнадзор, 2003.

То есть, ФГУП «НО РАО» предписано выполнять нормы работ, применительно к ядерным сооружениям, комплексам и установкам ЯТЦ.

5. ПГЗРО на участке «Енисейский» создается для поддержки решения задачи высшего приоритета – переработки ОЯТ. «Важно, что во всех случаях перспективные ядерные топливные циклы должны быть обеспечены надежной и безопасной системой удаления избыточной активности, являющейся в прямом смысле не подлежащими дальнейшему использованию материалами, то есть радиоактивными отходами. Самые опасные из них нуждаются в размещении в геологическом объекте» [54]. Участником реализации Стратегии создания ПГЗРО является НТС № 5 Госкорпорации «Росатом» «Завершающая стадия ядерного топливного цикла».

6. Видимо, в номенклатуре планируемых к захоронению в федеральном ПГЗРО Железногорска заметное место будут занимать и РАО 1 и 2 классов опасности других комбинатов Росатома, где выполняются работы со свежим или отработавшим топливом.

7. Действуют также, например, при выводе из эксплуатации открытого бассейна-хранилища РАО № 365 ГХК, том 1 [55]:

НП 016-05 «Общие положения обеспечения (ядерной и радиационной) безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ)»;

НП-070-06 «Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов объектов ядерного топливного цикла»;

НП-077-06 «Требования к содержанию плана мероприятий по защите персонала в случае аварии на предприятии ядерного топливного цикла»;

НП-057-17 «Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации ядерных установок ядерного топливного цикла» (с. 20, 142).

Вывод по важному вопросу схемы работ в томе 1:

Реализация намечаемой деятельности по выбранному варианту вывода из эксплуатации «Ликвидация объекта ядерного топливного цикла, реализуемая способом «Немедленная ликвидация объекта

ЯТЦ» при безусловном соблюдении ядерной и радиационной безопасности является наилучшим вариантом (с. 22).

8. Свидетельством Госкорпорации «Росатом» от 07.03.2012 № ГК-С008 ФГУП «НО РАО» было признано организацией, пригодной эксплуатировать ядерные установки.

ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ.

Пожалуй, необходимо признать:

I. ДА, ПГЗРО НА УЧАСТКЕ «ЕНИСЕЙСКИЙ» ЯВЛЯЕТСЯ ЯДЕРНЫМ ОБЪЕКТОМ (УСТАНОВКОЙ, СООРУЖЕНИЕМ, КОМПЛЕКСОМ) ЯТЦ: 1. Напрямую, соответственно п. 1.1 НП-050-03; 2. Аналогично статусу всех/других объектов обращения с РАО на промышленной территории ГХК, технологических спутников ГХК, на которые распространяются Нормы и Правила для ЯУ ЯТЦ и для которых оформляются Заключения по ядерной безопасности; 3. Соответственно термину МАГАТЭ в контексте Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами ([13], ядерная установка nuclear facility, с. 284, п. 3);

II. ДА, ДЕЙСТВИЕ НП-050-03 НА ПГЗРО участка «Енисейский» РАСПРОСТРАНЯЕТСЯ.

Литература

1. «Экономика ядерного топливного цикла». – М.,1999, перевод Информ-Атом.
2. Комлев В. Н.: Глубинный ядерный могильник (https://proza.ru/2020/05/10/812), Ядерный могильник на Енисее и норвежская Беллона (https://proza.ru/2018/11/07/898), Научные эксперты о ядерном могильнике (https://proza.ru/2020/06/25/1546), Радиоактивные отходы как повод подумать о вечном (https://proza.ru/2018/02/13/284).
3. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности ПГЗРО в Нижнеканском массиве (http://www.ibrae.ac.ru/contents/451/).
4. Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние (http://radwaste-journal.ru/docs/116/prepr2019i03.pdf).
5. Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (http://en.ibrae.ac.ru/docs/Radwaste_Journal_2(3)18/114_120_Strategy.pdf).
6. Ковальчук А. А. Программа международного научно-практического семинара и технического тура для участников международного научно-практического семинара «Имплементация Соглашения об информационном взаимодействии государств – участников СНГ при перемещении радиоактивных источников», доклад «Национальный оператор по обращению с РАО: основы, планы и реализация деятельности по захоронению РАО» / ФГУП «НО РАО», 5 декабря 2018 г., М. / Комиссия государств – участников Содружества Независимых Государств по использованию атомной энергии в мирных целях (http://sng-atom.com).
7. Лицензия Ростехнадзора ГН-01,02-304-3318. На размещение и сооружение пункта хранения радиоактивных отходов. Объект, на котором и/или в отношении которого проводится заявленная деятельность: стационарные объекты и сооружения, не относящиеся к ядерным установкам, радиационным источникам и предназначенные для хранения радиоактивных веществ, хранения или захоронения радиоактивных отходов в составе подземной исследовательской лаборатории / ФГУП «НО РАО», 27 декабря 2016 г., М (http://www.gosnadzor.ru/service/list/reestr_licences_170fz/license.php?licNum=%D0%93%D0%9D-01%2C02-304-3318).
8. Протокол ГКЗ № 4523 от 03-02-2016 (https://yadi.sk/i/Nbvvx8zrv58tlQ).
9. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО, М., 2015 (http://xn---2030-bwe0hj7au5h.xn--p1ai/upload/iblock/d5a/d5a48e55bcd4d5c8df15fe4a91d08723.pdf).
10. Особые радиоактивные отходы, М., 2015 (http://xn---2030-bwe0hj7au5h.xn--p1ai/upload/iblock/cc5/cc536086a1af77aab435d88b1581f79a.PDF).
11. Материалы обоснования лицензии, МОЛ, на размещение и сооружение не относящегося к ядерным установкам пункта хранения РАО, создаваемого в соответствии с проектной документацией на строительство объектов окончательной изоляции РАО (Красноярский край, Нижне-Канский массив) в составе подземной исследовательской лаборатории. – Т. 1. – С. 13 (http://www.norao.ru/ecology/mol/).
12. ФГУП «НО РАО». Филиалы и отделение (http://www.norao.ru/about/affiliates/).
13. ГЛОССАРИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ БЕЗОПАСНОСТИ (2007 г.) (https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/IAEASafetyGlossary2007/Glossary/SafetyGlossary_2007r.pdf).
14. Красильников Виктор. Мнение эксперта / ФЦП ЯРБ-2: Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года» (http://xn---2030-bwe0hj7au5h.xn--p1ai/expertise/expert-opinion/detail.php?ID=2005).

15. Лицензия Роснедр КРР 16117 ЗД. На захоронение радиоактивных отходов в глубоких горизонтах / ФГУП «НО РАО», 22 июля 2016 г., М (https://rfgf.ru/license/itemview.php?iid=2717774).
16. Материалы обоснования лицензии (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду) на осуществление деятельности в области использования атомной энергии «Эксплуатация пункта хранения ядерных материалов. Стационарное сооружение, предназначенное для хранения ядерных материалов – водоохлаждаемое хранилище облученных тепловыделяющих сборок ядерных реакторов типа ВВЭР-1000, содержащих отработавшее ядерное топливо» (https://sibghk.ru/images/services/docpack/2021/05/001.pdf).
17. В подземной лаборатории пройдет более 150 исследований // Город и горожане. Железногорск, 16 ноября 2017 (http://www.gig26.ru/news/reklama/nid-11876.html).
18. Скала / ФГУП «Горно-химический комбинат» (https://sibghk.ru/images/pdf/skala/skala.pdf).
19. SOSновый Бор, ядерный кластер южного берега Финского залива и уроки Чернобыля / http://decommission.ru/ от 02.05.2021.
20. Комлев В. Н. Глубинное захоронение радиоактивных отходов: требования и реальность // Маркшейдерский вестник, 2020. – № 6. – С. 61.
21. Комлев В. Н. Закон о недрах и радиационная безопасность страны (https://proza.ru/2020/09/20/903).
22. Васильев Н. Ф. Отзыв на статью // Уральский геологический журнал, 2021. – № 1. – С. 58–59.
23. Баринов А. С., Ткаченко А. В., Спешилов С. Л. Глубинная закачка жидких радиоактивных отходов (http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/Prezentetion_31_10_2013/Speshilov.pdf).
24. Вакуловский С. М. Оценка радиационного воздействия Горно-химического комбината на экосистему Енисея // Безопасность Окружающей Среды, № 2-2008: Радиационный мониторинг. – С. 40–43.
25. Зверев А. Б. Результаты натурных исследований устойчивости камерных сооружений подземной атомной станции. Тезисы докладов международной конференции «Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики». – Апатиты, 1992.
26. Дзебоев Б. А., Гвишиани А. Д., Белов И. О. и др. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе алгоритма с единственным чистым классом обучения: I. Алтай–Саяны–Прибайкалье. M ≥ 6,0 // Физика Земли, 2019. – № 4. – С. 33–47.
27. Татаринов В. Н., Морозов В. В., Колесников И. Ю. и др. Устойчивость геологической среды как основа безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива // Надежность и безопасность энергетики, №1-2014. – С. 25–29.
28. Колесников И. Ю., Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Татаринова Т. А. Напряженно-деформированное энергетическое районирование геологической среды для размещения экологических инфраструктурных объектов // Инноватика и экспертиза, 2017. – Вып. 2 (20). – С. 77–88.
29. Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И. Подземная исследовательская лаборатория: геодинамические и сейсмотектонические аспекты безопасности // Радиоактивные отходы, 2018. – № 3 (4). – С. 16–29.
30. Федеральные нормы и правила: Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях. РБ-019-17; Размещение ядерных установок ядерного топливного цикла. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. НП-050-03.
31. Гвишиани А. Д., Татаринов В. Н. Системная оценка факторов, определяющих устойчивость геологической среды при захоронении высокоактивных радиоактивных отходов // Вестник НЯЦ РК, выпуск 2, июнь 2019. – С. 44–50.
32. Красноярский горнохимический комбинат (ГХК) (http://www.yabloko.ru/Publ/Atom/atom00016.html).
33. Клер В. Р. Канско-Ачинский буроугольный бассейн (http://www.mining-enc.ru/images/k/4/kanskoachinskij_ugolnyj_bassejn_resize.jpg).
34. Схема территориального планирования Красноярского края (http://minstroy.krskstate.ru/dat/bin/art_attach/7633_9_stp_kk_tom_vi_prilojeniy_castx_1.pdf).
35. Лобацкая Р. М. Разломно-блоковая структура Байкало-Енисейского разлома в районе эксплуатации объектов ядерной энергетики // Геодинамика и тектоника, 2014. – 5 (2). – С. 547–562.
36. Стройка века и на века / ФГУП «НО РАО» (http://norao.ru/press/multimedia/2495/).
37. Красноярский «могильник»: разговор начистоту (http://online.newslab.ru/noran).
38. Комлев В. Н. Геологическое изучение площадки российского пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (Первый шаг – всегда самый сложный) // Маркшейдерский вестник, 2021. – № 1. – С. 48–54.
39. Комлев В. Н. К обоснованию пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (рецензия на две статьи о геологическом изучении места) // Уральский геологический журнал, 2021. – № 1. – С. 53–58.
40. Утилизация радиоактивных отходов в Фукусиме обойдется недешево (http://bezrao.ru/n/4296).

41. Курильский остров Симушир может стать хранилищем радиоактивных отходов (https://ecosakh.ru/category/glavnaya/raze/simushir/; https://sakhalin.info/news/9807).
42. Радиоактивные отходы превратят в минералы (https://www.nkj.ru/news/18950/).
43. Возможность изменения статуса ПГЗРО: http://bezrao.ru/n/4437, https://www.atomic-energy.ru/news/2021/04/22/113523, http://www.atomic-energy.ru/interviews/2017/01/16/71717, http://www.atomic-energy.ru/interviews/2018/03/15/84085.
44. Гарагаш И. А., Лобковский Л. И. Деформационные тектонические волны как возможный триггерный механизм активизации эмиссии метана в Арктике // Арктика: экология и экономика, 2021. – Т. 11. – № 41. – С. 42–50.
45. Ковач Татьяна. Про пункт захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в Железногорске (https://groups.google.com/g/enwl/c/PcnanPXU55Y).
46. Представители Российской академии наук ответили на вопросы о подземной лаборатории (https://www.atomic-energy.ru/news/2020/07/16/105480).
47. В Москве прошло очередное заседание Общественного совета Росатома (https://www.atomic-energy.ru/news/2021/03/26/112659).
48. 48. Веселов Макс. Могильник Росатома: лицензия есть, стройка идёт, заключения о безопасности — нет (https://babr24.com/n2f/2020/6/_na_razrabotku_zakluceniy_po_yrb_rao_1_klassa.pdf; https://babr24.com/kras/?IDE=201692).
49. Бейгул В. П., Мартынов К. В., Захарова Е. В, Еремин Е. А. Анализ процессов локализации делящихся радионуклидов в технологической скважине для обоснования ядерной безопасности глубинного захоронения радиоактивных отходов (https://www.atomic-energy.ru/technology/99896).
50. ТЗ 319/127 от 05.03.21 на оказание услуг по разработке заключения по ядерной безопасности… / ФГУП «НО РАО», Железногорский филиал (https://vk.com/wall-66070450_7020).
51. ПЛАН-ГРАФИК закупок товаров, работ, услуг для обеспечения федеральных нужд на 2017 год / ФГУП «НО РАО» (п. 168, https://zakupki.gov.ru/epz/orderplan/printForm/view.html?printFormId=9721126).
52. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов» (НП-100-17).
53. Нормативные документы / ФГУП «НО РАО» (http://www.norao.ru/about/docs/).
54. Крюков О. В., Краткий комментарий к утверждению «Стратегии создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов» (http://radwaste-journal.ru/docs/journals/3/016i017ikryukov-16-17.pdf).
55. Вывод из эксплуатации открытого бассейна-хранилища радиоактивных отходов № 365 ФГУП «ГХК», том I (https://sibghk.ru/images/services/docpack/2021/04/001.pdf).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УРОВНЕЙ НАКОПЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКАХ ОБЬ-ИРТЫШСКОЙ РЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

А. В. Коржавин, В. Н. Трапезникова, В. Н. Николкин, А. В. Трапезников

Институт экологии растений и животных УрО РАН
Екатеринбург, Россия, BFS_zar@mail.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF ACCUMULATION LEVELS OF TECHNOGENIC RADIONUCLIDES IN GROUND DEPOSITS ON VARIOUS SITES OF THE OB-IRTYSH RIVER SYSTEM

A. V. Korzhavin, V. N. Trapeznikova, V. N. Nikolkin, A. V. Trapeznikov

Institute of plant ecology and animals OURO RAHN
Yekaterinburg, Russia, BFS_zar@mail.ru

Assessment of the ^{137}Cs and ^{90}Sr pollution modern levels of ground deposits in Techa and Irtysh Rivers is presented. Mathematical models of their distribution and accumulation in ground deposits of the Ob-Irtysh river system are constructed. Calculations of the technogenic radionuclides integral reserves in ground deposits of Techa, Iset, Tobol, and Irtysh Rivers are executed. It is shown that the ^{90}Sr specific stocks increase in ground deposits of Techa River on watercourse while for ^{137}Cs their essential reduction is noted. The specific reserves of both radionuclides in ground deposits in downstream sections of the Tobol-Irtysh rivers system monotonously decrease on current, at the same time the ^{90}Sr stocks prevail over the ^{137}Cs stocks.

Введение

Открытые речные экосистемы по отношению к радиоактивным веществам выполняют две очень важные функции. С одной стороны – это транспортная функция. Радионуклиды, поступившие в речные экосистемы со сточными водами предприятий ядерного цикла или с площади водосбора, способны переноситься на многие десятки и сотни километров. С другой стороны, любая пресноводная экосистема выполняет барьерную роль. В зависимости от своих химических характеристик техногенные радионуклиды способны откладываться и накапливаться в различных компонентах речных экосистем, причем это накопление происходит не равномерно. Натурными исследованиями показано, что основным депо радионуклидов в пресноводных биогеоцинозах являются донные отложения водоема, которые поглощают 80 % и более радионуклидов, затем следует водная компонента (в пределах от долей процента до 20 %) и, наконец, гидробионты (высшие водные растения могут аккумулировать в общей сложности доли процента от суммарной активности в водоеме). В речных экосистемах основным депо радионуклидов являются пойменные почвы и донные отложения пойменных водоемов, которые поглощают 80 % и более нуклидов [4].

Бассейну реки Обь принадлежит важное место в экономике России, ее водные ресурсы обеспечивают потребности населения и жизнедеятельности региона, используются для водоснабжения, судоходства, рыболовства и рекреации. В пределах территории Обского бассейна проживает 22 млн. человек (15 % от всего населения России). В 1949–1952 гг., вследствие отсутствия надлежащих технологических систем обращения с жидкими отходами радиохимического производства, с ПО «Маяк» было сброшено 2,75 миллионов Кюри (100 ПБк) радиоактивных отходов в реку Теча, являющуюся частью Обь-Иртышской речной системы. В результате облучению подверглись 124 тысячи человек, проживавших в прибрежной зоне рек Теча и Исеть в пределах Челябинской и Курганской областей [6].

Часть радионуклидов транзитом прошла через р. Течу и поступила в р. Исеть, входящую, как и первая река, в Обь-Иртышскую речную систему. Другая значительная часть нуклидов была депонирована в донных отложениях рек и в пойменных почвах. По имеющимся оценкам общее количество радионуклидов в воде и грунтах Течи составляет $6 \cdot 10^{12}$ Бк для ^{137}Cs, $0{,}32 \cdot 10^{12}$ Бк для ^{90}Sr [5].

В пойме р. Течи в 18 км от плотины оконечного водоема на площади 45 га, в так называемых Асановских болотах, депонировано 0,22 ПБк (6 тыс. Ки) ^{90}Sr и ^{137}Cs. Часть этой активности ежегодно вымывается с паводковыми водами в Обь-Иртышскую речную систему [1].

Несмотря на то, что пойменные почвы в речных экосистемах являются основным депо радионуклидов, донные отложения тоже играют очень важную роль не только в процессах депонирования, но и в процессах переноса радионуклидов, постоянно контактируя и обмениваясь с водной компонентой. Из-

учение процессов распределения радионуклидов в донных отложениях на примере Обь-Иртышской речной системы является очень важной как научной, так и практической задачей, поскольку позволяет отследить закономерности миграции техногенных радионуклидов от источника загрязнения по руслам рек на большие расстояния с учетом их химических и миграционных характеристик.

Данная работа посвящена оценке современных уровней загрязнения техногенными радионуклидами донных отложений рек Теча и Иртыш, а также построению эмпирических моделей их распределения и накопления в донных отложениях Обь-Иртышской речной системы.

Материалы и методы

Пробы донных отложений отбирали в соответствии с ГОСТ 17.1.5.01-80 [3] при помощи трубчатого пробоотборника до глубины до 30 см, разделяя извлеченные керны на последовательные сегменты длиной 5 см. В лабораторных условиях подготовка проб проводилась в соответствии с ГОСТ Р ИСО 11464-2011 [2], которая включала операции высушивания, дробления, просеивания и размола.

Измерения содержания ^{137}Cs в нативных образцах проводили на низкофоновом полупроводниковом гамма-спектрометре «DSPTC-jr» фирмы «Ortec» (США) с коаксиальным детектором из высокоочищенного германия (HPGe), по гамма-линии 661,2 кэВ с эффективностью 40 % и погрешностью измерений не более 10 %.

Для определения ^{90}Sr пробы донных отложений подвергали дополнительной радиохимической обработке, включавшей выщелачивание радионуклида 6-нормальной соляной кислотой, выделение осадка ^{90}Sr в форме оксалата, его высушивание, прокаливание, взвешивание и измерение β-активности сконцентрированных препаратов на малофоновой установке УМФ-2000 (НПО «Доза», Россия) с нижним пределом обнаружения 0,02 Бк/кг и статистической погрешностью измерения не более 10 %.

Плотность запасов радионкулидов в донных отложениях исследованных рек определена послойным суммированием активности на всю глубину отобранных почвенных кернов. Статистическая обработка результатов заключалась в определении среднеарифметического значения и стандартного отклонения среднего арифметического.

Результаты и их обсуждение

Плотности запасов радионуклидов в донных отложениях Обь-Иртышской речной системы представлены на рис. 1.

Запасы радионуклидов в донных отложениях р. Теча распределены неравномерно. Основные запасы ^{137}Cs сосредоточены в верховьях реки, а по мере удаления от истока содержание данного радионуклида в донных отложениях значительно снижается. Величина суммарных запасов ^{90}Sr, напротив, возрастает по течению реки. На нижерасположенных участках рек системы Тобол-Иртыш запасы обоих радионуклидов в донных отложениях монотонно уменьшаются по течению, причем запасы ^{90}Sr превалируют над запасами ^{137}Cs.

Это объясняется разными миграционными характеристиками радионуклидов. Высокая миграционная подвижность ^{90}Sr в речных системах обеспечивается его хорошей растворимостью в воде и слабым удержанием донными отложениями и почвой. Цезий-137, в отличие от сторонция-90, легко сорбируется и удерживается донными отложениями и пойменными почвами. Это наглядно подтверждается распределением запасов ^{137}Cs в донных отложениях р. Теча.

Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в донных отложениях в реках Обь-Иртышской речной системы с высоким значением квадрата коэффициента корреляции R^2 аппроксимировано следующими регрессионными уравнениями:

$$^{137}\text{Cs (Бк/кв.м.)}\text{– } = 2{,}17\text{E+09 } x^{-2{,}03},\ R^2 = 0{,}86 \qquad (1)$$

$$^{90}\text{Sr (Бк/кв.м.)}\text{– } = y = 13294e^{-0{,}001x},\ R^2 = 0{,}72 \qquad (2)$$

На рис. 2 представлены эмпирические модели горизонтального распределения техногенных радионуклидов в донных отложениях Обь-Иртышской речной системы. График распределение ^{137}Cs резко снижается по мере удаления от источника загрязнения. График распределение ^{90}Sr монотонно снижается на протяжении всего исследованного участка речной системы.

Интегральные запасы радионуклидов в донных отложениях определены при следующих допущениях: средняя ширина донного полотна р. Течи принята равной 15 м, р. Исети – 25 м, рек Тобол и Иртыш – 1,5 км.

Полученные оценки интегральных запасов (Бк) составили:

а) для ^{137}Cs:

$$0{,}015 \cdot 10^6 \cdot \int_{49}^{237} (2{,}17 \cdot 10^9 \cdot \underline{x}^{-2{,}03})\, d\underline{x} = (\text{р.Теча}) \qquad (3)$$

$$= 4{,}607 \cdot 10^{11}$$

$$0{,}025 \cdot 10^6 \cdot \int_{237}^{550} (2{,}17 \cdot 10^9 \cdot \underline{x}^{-2{,}03})\, d\underline{x} = (\text{р. Исеть}) \qquad (4)$$

$$= 1{,}094 \cdot 10^{11}$$

$$1{,}5 \cdot 10^6 \cdot \int_{550}^{1580} (2{,}17 \cdot 10^9 \cdot \underline{x}^{-2{,}03})\, d\underline{x} = (\text{р. Тобол-Иртыш}) \qquad (5)$$

$$= 3{,}151 \cdot 10^{12}$$

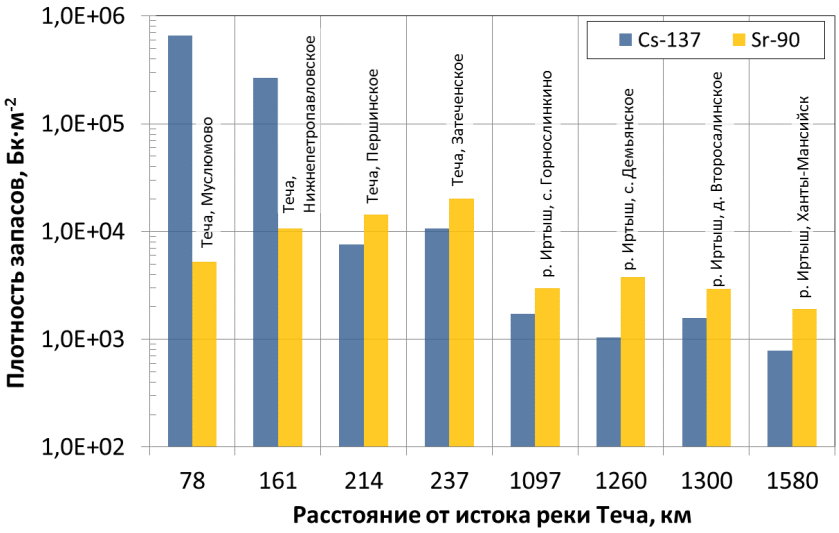


Рис. 1. Плотности запасов радионуклидов в донных отложениях

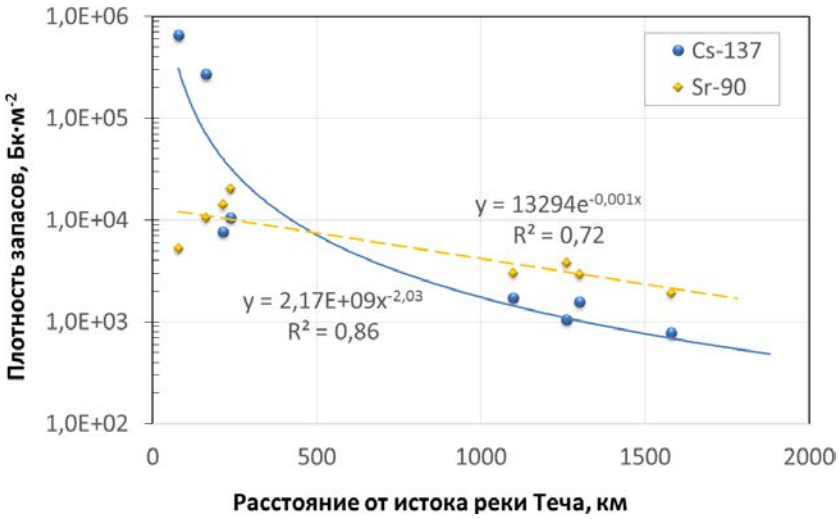


Рис. 2. Эмпирические модели горизонтального распределения ^{90}Sr и ^{137}Cs в донных отложениях Обь-Иртышской речной системы

$$4{,}607 \cdot 10^{11} + 1{,}094 \cdot 10^{11} + 3{,}151 \cdot 10^{12} = 3{,}721 \cdot 10^{12} \text{ (суммарно)} \quad (6)$$

б) для ^{90}Sr:

$$0{,}015 \cdot 10^{6} \cdot \int_{49}^{237} (13294 \cdot e^{-0{,}00116 \cdot x})\, dx = \text{(р.Теча)} \quad (7)$$

$$= 3{,}182 \cdot 10^{10}$$

$$0{,}025 \cdot 10^{6} \cdot \int_{237}^{550} (13294 \cdot e^{-0{,}00116 \cdot x})\, dx = \text{(р. Исеть)} \quad (8)$$

$$= 6{,}627 \cdot 10^{10}$$

$$1{,}5 \cdot 10^{6} \cdot \int_{550}^{1580} (13294 \cdot e^{-0{,}00116 \cdot x})\, dx = \text{(р. Тобол-Иртыш)} \quad (9)$$

$$= 6{,}333 \cdot 10^{12}$$

$$3{,}182 \cdot 10^{10} + 6{,}627 \cdot 10^{10} + 6{,}333 \cdot 10^{12} = 6{,}431 \cdot 10^{12} \text{ (суммарно)} \quad (10)$$

где x – расстояние в километрах, e – экспонента.

Заключение

1. Представлены данные об уровнях загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr донных отложений рек Теча и Иртыш. Приведены эмпирические модели, описывающие закономерности горизонтального распределения техногенных радионуклидов в донных отложениях Обь-Иртышской речной системы.

2. Основные запасы ^{137}Cs в донных отложениях р. Теча сосредоточены в верховьях реки, по мере удаления от истока содержание данного радионуклида в донных отложениях значительно снижается. В количественном отношении суммарные запасы ^{137}Cs в верховьях реки превышают запасы ^{90}Sr. Величина интегральных запасов ^{90}Sr, напротив, возрастает по течению реки. На нижерасположенных участках системы рек Тобол-Иртыш суммарные запасы обоих радионуклидов в донных отложениях монотонно уменьшаются по течению, причем запасы ^{90}Sr превалируют над запасами ^{137}Cs.

3. Расчетные величины запасов ^{137}Cs в донных отложениях р. Теча составили 460,7 ГБк, величина запасов ^{90}Sr существенно ниже – 31,8 ГБк. Суммарная оценка запасов ^{137}Cs в донных отложениях рек Теча, Исеть, Тобол и Иртыш составила 3,7 ТБк, для ^{90}Sr интегральная оценка запасов составила 6,4 ТБк.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН, тема № АААА-А19-119032090023-0.

Литература

1. Заключение комиссии под председательством вице-президента АН СССР О. М. Нефедова, организованной распоряжением Президента СССР № РП-1283 от 3 января 1991 г, по экологической и радиоэкологической обстановке в Челябинской области. – М, 1991. – 157 с.
2. Качество почвы. Предварительная подготовка проб для физико-химического анализа: ГОСТ Р ИСО 11464-2011. – М.: Стандартинформ, 2012. – 12 с.
3. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность: ГОСТ 17.1.5.01-80. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1980. – 5 с.
4. Трапезников А. В. Радиоэкология пресноводных экосистем / А. В. Трапезников, В. Н. Трапезникова. – Екатеринбург: Изд-во УрГСХА, 2006. – 390 с.
5. Трапезников А. В. ^{60}Co, ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{239,240}Pu в пресноводных экосистемах. – Екатеринбург: Изд-во «АкадемНаука», 2010. – 510 с.
6. Чуканов В. Н. Генезис и концепция Государственной программы Российской Федерации по радиационной реабилитации Уральского региона / В. Н. Чуканов, П. В. Волобуев, Е. Г Дрожко, Б. А. Коробицын, Г. Н. Романов, Л. Г. Стоббе, А. В. Трапезников, В.А. Ячменев, В.И. Кирюшкин. – Екатеринбург, 1993. – 66 с.

РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Г. Л. Корюкин, О. В. Шапошников

НПЦ «Геосфера+»
Москва, Россия, geokor2@gmail.com, shaposhnikov_ov@mail.ru

RADIOMETRIC RESEARCH METHODS IN GEOCHEMICAL PROSPECTING FOR OIL AND GAS FIELDS IN EASTERN SIBERIA

G. L. Koryukin, O. V. Shaposhnikov

SPC "Geosphere+"
Moscow, Russia, geokor2@gmail.com, shaposhnikov_ov@mail.ru

The paper presents complex geochemical oil and gas prospecting studies within the prospective sites provided for conducting field geochemical search and survey works, namely: sampling of near – surface soil from a depth of 1–3 meters using a profile observation system within the main structures in the volume of 1000 p.km; performing laboratory chemical and analytical studies, including degassing of samples, chromatographic analysis for free gases (Ne, H_2, CO_2, $N_2 + O_2$, C_1–C_5,); chromatographic analysis for light hydrocarbons (vapor C_7–C_9, including aromatic); chromatographic analysis for heavy hydrocarbons (C_6–$C_{10}H_{22}$). The authors also analyzed a total of 4994 gas-geochemical samples and 4994 lithochemical samples taken from 4,848 stations.

Введение

В настоящей статье представлены результаты геохимических нефтегазопоисковых исследований, выполненных в пределах перспективных участков Восточной Сибири.

Целью проведения геохимической съемки была оценка перспектив нефтегазоносности, выделение перспективных локальных объектов для оптимизации геологоразведочных работ (ГРР) на нефть и газ [1, 3].

Комплексные геохимические нефтегазопоисковые исследования в пределах перспективных участков предусматривали проведение полевых геохимических поисково- съемочных работ: пробоотбор приповерхностного грунта с глубины 1–3 метра с использование профильной системы наблюдений в пределах основных структур в объеме 1000 погонных км; выполнение лабораторных химико-аналитических исследований, включающих дегазацию проб, хроматографический анализ на свободные газы (Не, H_2, CO_2, $N_2 + O_2$, C_1–C_5,); хроматографический анализ на лёгкие УВ (парообразные C_7–C_9, включая ароматические); хроматографический анализ на тяжёлые УВ (C_6–$C_{10}H_{22}$). Всего проанализировано 4994 газогеохимических проб и 4994 литохимических проб, отобранных из 4848 станций.

Геохимическими компонентами современных подпочвенных отложений являются: УВ (от CH_4 до $C_{10}H_{22}$ включительно), а также CO_2, Не, H_2, N_2. Гомологи метана в основном представляют широкий спектр различных соединений, включающий предельные УВ, непредельные УВ, изо-соединения. В обработку литогеохимических исследований были включены данные по 17 микроэлементам, содержания которых превысили предел обнаружения.

В рамках работ были проведены радиометрические исследования - изучение плотности потока радона и гамма-активности в 4848 пробах.

Следует отметить, что исследования плотности потока радона практически не применялось для поисков месторождений нефти и газа. Поэтому настоящие исследования следует рассматривать как рекогносцировочные, с целью выявления зон повышенной проницаемости в верхних горизонтах осадочного чехла в пределах перспективных участков Восточной Сибири.

Методы и результаты исследований

Измерение радона в подпочвенном воздухе соответствовали методике измерения плотности потока радона (ППР) с поверхности земли (НТЦ «Нитон». М. 1993 г.) [2]. Применяемая аппаратура – комплекс «Камера-01» (рис. 1) с блоками бета-детектирования БДБ-13, которая рекомендована, как наиболее эффективная, учеными «Института земной коры» РАН и специалистами ФГУГП «Урангео» БФ «Сосновгеология». Постановка метода проводилась после завершения периода активного таяния грунтов для исключения фиксирования неустойчивых аномалий. Объем контрольных измерений – около 3 %, средняя погрешность измерений не превышает 20 %.

Исследуемый участок земной поверхности очищался от дерна, камней и прочих предметов, препятствующих установке накопительной камеры НК-32. Накопительная камера устанавливалась на предварительно взрыхленную до глубины 2–3 см поверх-

Рис. 1. Комплекс «Камера-01» для измерения плотности потока радона (ППР) с поверхности земли

ность. Внутрь засыпался подготовленный уголь из сорбционной колонки СК-13, сверху устанавливается защитная СК с защитной крышкой, которая препятствует поступлению радона из атмосферного воздуха. Подготовленный пробоотборник экспонируется в течение 1–10 часов, после чего изымается уголь в рабочую СК-13 и измеряется на комплексе «Камера-01» с предварительным ожиданием не менее 1–3, но не более 12 часов.

При интерпретации результатов радоновых исследований использовалась специализированная программа Геоскан Ойл ланд, разработанная в ООО «НПЦ «Геосфера+».

Принимая во внимание наши представления, что максимальные значения потока радона свидетельствуют о существовании зон повышенной проницаемости, отождествляемых с каналами миграции углеводородных газов (УВГ), а минимальные (ниже измеренных фоновых значений плотности потока радона) с газонепроницаемыми покрышками на пути субвертикального массопереноса химических компонентов были выполнены две независимые обработки полученной информации.

Значения плотности потока радона – от 0 до 22 мБк/м^2 с, т. е. самые минимальные показатели, свидетельствующие о квазинепроницаемых отложениях осадочного чехла.

Следует отметить, что радон имеет очень низкие значения корреляции с перечисленными геохимическими показателями, что указывает на различные генетическую природу и условия формирования отмеченных геохимических компонентов.

Минимальные значения плотность потока радона (ППР) в пределах рассматриваемой площади распределяются, в виде покровного «облака», которое обволакивает всю исследуемую площадь и отождествляется с изолирующей покрышкой. Лишь в центральной части изучаемого участка зоны повышенного проникновения потоков радона как бы ограничивают предполагаемую залежь углеводородов (УВ). Прогнозируется, что по данным радоновой съемки скопления УВ располагаются между профилями на западе (внешняя граница ГВК), на севере, на юге и востоке и отражают внутреннюю границу ГВК. На указанных профилях формируются сквозные «окна» (темно-синие пятна), обусловленные очагами газовых проявлений, которые располагаются по периферии предполагаемых скоплений УВ (рис. 2). В тоже время восточная граница скоплений УВ возможно располагается дальше на восток, так как геохимическое профилирование восточнее изучаемого участка не выполнялось.

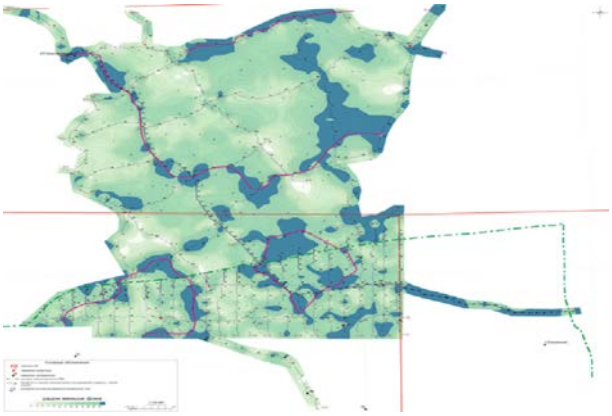


Рис. 2. Схема распределения минимальных значений плотности потока радона, установленных в подпочвенных отложениях на изучаемом участке, отождествляемых с квазинепроницаемым чехлом осадочных пород

Карта распределения плотности потока радона схематично отражает несколько кольцевых зон, где центральная зона располагается в центральной части участка, а в районе южной части имеют место перспективные участки: западный и восточный. Следует отметить, что указанные участки - изображаются и на других картах распределения микроэлементов, газов: He, C_2–C_5, C_2H_6, C_5H_{12} и т. д.

Значения потока радона – от 23 до 3170 мБк/м^2 с, т. е. самые аномальные показатели, свидетельствующие о зонах с активной проницаемости осадочного чехла. Как правило, повышенные значения радона группируются в виде очаговых аномалий, которые окаймляют границы выделенных блоков, формируя эпигенетические окна разгрузки газовых компонентов (рис. 3).

Примечательно – повышенные значения плотности радон имеют также очень низкие индексы корреляции с перечисленными элементами, что указывает на различную генетическую природу и условия формирования отмеченных геохимических компонентов.

В основном, аномальные значения радона имеют значительное распространение на периферийных участках предполагаемых скоплений УВ, – на некоторых станциях радон формирует контрастные

Рис. 3. Схема распределения повышенных значений плотности потока радона, установленных в подпочвенных отложениях на изучаемом участке, отождествляемыми с наиболее проницаемыми зонами в чехле осадочных пород

аномалии до 3170 мБк/м^2 с (станция С19-6), до 1470 мБк/м^2 с (станция А1-256), до 1430 мБк/м^2 с (станция С21-37), до 1110 мБк/м^2 с (станция С6-32) при фоне 41 мБк/м^2 с.

Так же, как и минимальные значения измерений потока радона, максимальные значения схематично отражает несколько кольцевых зон, где центральная зона располагается в центральной части изучаемого участка, а в районе южной части имеют место перспективные участки: западный и восточный. Следует отметить, что указанные участки – отражаются и на других картах распределения аномальных содержаний: микроэлементов, Не, C_2–C_5, C_2H_6, C_5H_{12} и т. д.

Радиометрические исследования в пределах изучаемых площадей Восточной Сибири выполнялись по системе геохимических профилей, пересекающих северные, северо-западные и северо-восточные перспективные участки. Работы выполнялись с помощью аппаратуры: радиометров СРП-68-01 в количестве 3 штук, в период с июля по ноябрь. Всего было выполнено 3484 (658 пог. км) наблюдений на 3484 станциях.

Гамма-съемка производилась в профильном варианте по линиям сейсмических измерений прошлых лет, с целью выявления радиометрических аномалий, связанных с расположением нефтегазоносных осадочных толщ вблизи поверхности, а также при оценке радиометрических аномалий, выявленных геологическими маршрутами. Измерения при проведении радиометрической съемки проводилось с прибором СРП-68-01 с шагом 250 м, со сгущением шага 25–100 м, исходя из технического задания. Измерения по скважинам неглубокого бурения в 4В геометрии без свинцового экрана, неглубокие скважины пройдены в ходе буровых работ механическим способом до глубины 1,0–2,0 м. Объем контрольных измерений – около 3 %, погрешность измерений не превышала 10 %.

Естественная радиоактивность пород (интегральная и спектральная гамма-активности естественных радионуклидов К-40, Th-232, U-238 (Ra-226)) определялась на образцах, отобранных в керне скв. Квт-19, Квт-51, Квт-54, Квт- 55, Квт-56, Квт-57, Квт-58, Квт-63, Квт-65, Квт-67 и Квт-70. Также на керне скв. Квт-70 был выполнен спектральный гамма-каротаж.

Радиоактивные свойства пород были также изучены на образцах, отобранных в керне скв. Хнд-3, Хнд-4, Хнд-6, Хнд-7 и Хнд-10. Также естественная радиоактивность пород была изучена с помощью спектрального гамма-каротажа на керне скважин Хнд-8, Хнд-9.

Измерение естественной гамма-активности образцов в лаборатории петрофизики ВНИГНИ проводилось на спектрометрическом комплексе «Прогресс» с использованием компьютерной обработки данных.

По результатам сопоставления данных газового каротажа (ГК), полученных по керну, с данными газового каротажа, полученными в скважине, производилась увязка керна. В целом, естественная гамма-активность образцов изменяется не значительно. Небольшие вариации повышенных значений гамма-активности отмечаются лишь в районе над продуктивными алеврито-глинистых породами и вышезалегающих доломитов, отождествляемых с флюидоупорной покрышкой.

Радиометрическое поле в пределах перспективных участков неоднородно. В юго-восточной части изучаемой площади отмечается обособленный блок, перекрывающий всю южную часть площади. В то же время, в районе выделенных кольцевых аномалий в пределах центрального участка вырисовываются отдельные очаги изометричных разрозненных зон повышенной радиоактивности (рис. 3). Значения мощности дозы гамма-излучения небольшие от 3,5 до 5,5 мкР/ч. Аномальные проявления гамма-актив-

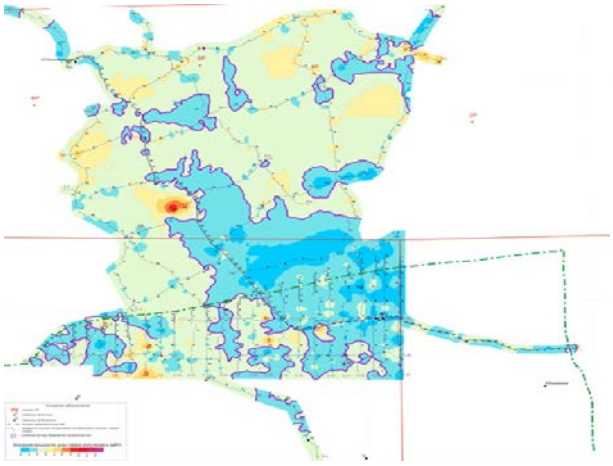


Рис. 4. Схема распределения мощности дозы гамма-излучения в мкР/ч, измеренных в подпочвенных отложениях на перспективных участках

ности отмечаются также разорванными зонами на границах предполагаемых скоплений УВ – со значениями гамма-активности от 6,5 до 9,5 мкР/ч.

По всей видимости, гамма-активность так же, как минимальные значения мощности потока радона на изучаемой площади, отражает контур контактных зон скоплений УВ и/или радиационное поле нижележащих отложений. Также не исключается отражение в радиационном поле подпочвенных пород – вторичного ореола соляных рассолов, обогащенных радиационными компонентами.

Заключение

Таким образом, использование радиометрических методов в комплексе с геохимическими исследованиями позволяет решать ряд важных задач, связанных с продуктивностью перспективных участков Восточной Сибири:

Получены, охарактеризованы и установлены критерии продуктивности газовых, литогеохимических и радиометрических показателей в приповерхностных отложениях, обусловленных их насыщенностью в осадочном разрезе.

- Выделены и оценены проводящие и экранирующие свойства некоторых тектонических нарушений по комплексу геохимических и радиометрических показателей.
- Показана нефтегазоносная роль аномальных геохимических полей концентраций и их приуроченность к отдельным структурным элементам перспективных участков.
- Выявлены литогеохимические аномалии, ореолы рассеяния которых пространственно совпадают с газовыми и радиометрическими аномальными зонами, что указывает на единые пути массопереноса вещества и энергии из предполагаемых скоплений УВ.
- Проведено районирование лицензионных участков по перспективам нефтегазоносности.
- Даны рекомендации на проведение дальнейших ГРР с целью оптимизации поисково-разведочных работ и уточнены места заложения скважин глубокого бурения.

Литература

1. Домаренко В. А., Поцелуев А. А. и др. Комплексные геохимические исследования в условиях горной тайги как основа крупномасштабного прогнозирования рудных месторождений. // Повышение эффективности геохимических методов поисков в таежных районах (VIII сессия Сибирского отделения СГПМ). – Иркутск, 1986. – С. 107–109.
2. Методика измерения плотности потока радона с поверхности земли и строительных конструкций. – М.: НТЦ «Нитон», 1993. – 6 с.
3. Соболев И. С., Домаренко В. А. Возможности обнаружения уранового оруденения гидрогенного типа на востоке Западно-Сибирской плиты. // Разведка и охрана недр, 2010. – № 11. – С. 24–32.

РАДИОАКТИВНЫЕ И ДРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В КОМПОНЕНТАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ТЕРРИТОРИИ УГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПРИБАЙКАЛЬЯ

П. В. Кузнецов, В. И. Гребенщикова

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН
Иркутск, Россия, petr-kp@mail.ru, vgrbe@igc.irk.ru

RADIOACTIVE AND OTHER ELEMENTS IN THE ENVIRONMENTAL COMPONENTS OF THE TERRITORY OF THE COAL DEPOSIT OF THE BAIKAL REGION

P. V. Kuznetsov, V. I. Grebenshchikova

A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS
Russia, 664033 Irkutsk, Favorsky str. 1 a, petr-kp@mail.ru; vgreb@igc.irk.ru

The chemical composition of the coal ash of the Golovinsky coal deposit in the Baikal region under development is characterized by a content of impurity elements not exceeding clark, except for Ni, Zr, and Th. The bedrock also contains Ni, Zr, and Th in high concentrations, which indicates a correlation between the chemical composition of the environmental components: rock-coal and rock-soil. Violation of the soil cover on the territory of the deposit is associated with the mechanical disturbance of the soil and the release of bedrock to the surface. The burning of the studied coals by industrial methods with effective ash collection systems is not likely to pose a serious environmental hazard but may pose a hazard if they are burned by other methods.

Введение

Иркутская область является одним из важных угледобывающих регионов России, прогнозные запасы угляздесь оцениваются в 28,9 млрд. тонн, а разведанные составляют 8,05 млрд. тонн [7]. Наиболее разработанный Иркутский угленосный бассейн является основной угольной базой Прибайкалья. Продолжающееся развитие угледобывающей отрасли включает в себя разработку и освоение новых участков месторождений. Это в свою очередь требует их эколого-геохимической оценки на предмет металлоносности, влияния добычи угля и продуктов его сжигания на состояние окружающей природной среды. Высокое содержание элементов-примесей, в том числе природных радионуклидов (Th, U) в углях и продуктах их сжигания, может представлять как экологическую опасность, так и практический интерес. Для Иркутского угленосного бассейна, формировавшегося в эпоху мезозоя, характерно накопление углефильных элементов: Ge, Sc, Au, Zr, U и других, связанное с терригенным и аквагенным факторами. Отмечается, что угли Сибири в целом обладают высоким редкометальным потенциалом [1]. Тем не менее,химический состав углей некоторых месторождений Иркутского угленосного бассейна еще недостаточно изучен с эколого-геохимических позиций, например, Головинского каменноугольного месторождения. В связи с этим целью данной работы являлось изучение химического состава углей (золы), а также компонентов окружающей среды одного из участков Головинского месторождения.

Материалы и методы

Объектами исследований служили зола углей, коренные породы и почвы на территории одного из разрабатываемых участков Головинского каменноугольного месторождения, расположенного в Аларском районе Усть-Ордынского бурятского округа Иркутской области и приуроченного к Иркутскому угленосному бассейну.

На изучаемой территории распространены серые лесные почвы на суглинистых отложениях пологих склонов с бугристо-западинным микрорельефом, частично распаханные или под светлохвойными кустарничково-травяными лесами. Коренные породы представлены нижнеюрскими песчаниками с прослоями углей [2]. В связи с разработкой месторождения почвенный покров нарушен, в результате этого коренные и почвообразующие породы выходят на дневную поверхность.

На разрабатываемом участке угольного разреза были отобраны пробы угля из верхней, средней и нижней пачек. Выше уровня залегания угольного пласта отбирались пробы коренных пород, представленных песчаниками и алевролитами. На удалении от угольного разреза под лесной растительностью была заложена почвенная прикопка (условно фоновый участок), из которой пробы почв отбирались по генетическим горизонтам. По периметру месторождения пробы почв отбирались из верхнего горизонта методом конверта.

Отобранные пробы угля предварительно озоляли по ГОСТ 11022-95. Содержание (в скобках показан

предел обнаружения, масс. %) MnO (0,1), Ba (0,015), Sr (0,005), Zr (0,001), Th ($1 \cdot 10^{-4}$), U ($1 \cdot 10^{-4}$) в почвах, породах и в золе углей определяли методом рентгено-флуоресцентного анализа (методики СТП ИГХ-003-2009, НСАМ-455-РС), содержание (мг/кг) B (2), Cu (5), Zn (10), Ge (0,8), Mo (0,3), Ag (0,03), Sn (0,8), Tl (0,3), Pb (0,8) определяли методом атомно-эмиссионного анализа (методика СТП-ИГХ-004-08), содержание (мг/кг) Ni (3) и Cd (0,03) определяли методом атомной адсорбции (СТП ИГХ-012-97).

Результаты и их обсуждение

Результаты исследований показали, что средние содержания в золе угля большинства элементов-примесей (табл. 1) ниже или варьируют в пределах кларка золы каменных углей, за исключением отдельных проб, в которых отмечено высокое содержание (мг/кг) Zn (1400), Ge (220) и B (1000). Повышенное содержание отмечено для никеля, тория и циркония. Наибольшее содержаниеих приурочено к верхней и нижней пачкам (контактным зонам).

Содержание урана в золе углей также неоднородно, лишь в отдельных пробах его содержание (32 мг/кг) превышает кларк. Накопление U, как и накопление тория, происходит в верхней и нижней пачках. Th/U-отношение в основном варьирует в пределах 2,0–3,0, незначительно увеличиваясь в верхней пачке до 3,5.

Источником рассмотренных элементов в углях могли служить породы, хотя существует и другая точка зрения: в исследованиях геохимических особенностей черемховской свиты [5] отмечается, что формирование углей происходило в период тектонического спокойствия, создававшего условия для озерно-болотного осадконакопления. Авторами показано, что сопутствующие полезные компоненты в углях генетически связаны непосредственно с углями, а не с вмещающими породами. Тем не менее, как и в золе в породах повышено содержание тех же элементов – Ni, Th, Zr, а также некоторых других – Ag, Tl, Pb, Ba, Zn, что свидетельствует о существующей взаимосвязи химического состава пород и угля (табл. 1). Th/U-отношение в коренных породах выше по сравнению с золой угля и варьирует в диапазоне от 3,1 до 5,0. Содержание остальных элементов в породах, так же, как и в золе углей, не превышает кларк.

Особенности химического состава коренных пород отражаются на химическом составе почв, основным источником элементов в которых они являются. Локальной особенностью химического состава изучаемых почв (табл. 2) в целом, является повышенное относительно кларка содержание Mn, что, очевидно, является геохимической особенностью региона в целом и, вероятно, связано с его биологическим накоплением. Относительно кларка незначительно повышены в почвах содержания Zr, Ni, Zn и Ba, а по сравнению с имеющимися региональными данными – Th и Pb.

Распределение элементов в почвах неоднородно и связано с влиянием природных факторов. В горизонте OY в почвах условно фонового участка (табл. 2) происходит накопление некоторых элементов по сравнению с минеральным BM горизонтом, которое вероятно обусловлено их биологическим накоплением (Mn, Ba, Ag, Cd). Распределение остальных микроэлементов в почвенном профиле либо однородно, либо их содержание увеличивается с глубиной профиля.

Неоднородность химического состава почв на территории месторождения обусловлена не только природными факторами, но и нарушениями, обусловленными разработкой угольного месторождения и выходом на дневную поверхность коренных пород. Например, содержание Mn в верхних горизонтах данных почв соответствует его содержанию в горизонте B почвы условно фонового участка. Однако, несмотря на нарушения, содержание микроэлементовв нарушенных почвах в большинстве случаев не превышает такового в почве условно фонового участка. Повышенное содержание микроэлементов отмечены в единичных случаях, например, свинца (77 мг/кг), что может быть обусловлено не только влиянием собственно разработки месторождения (например, попадания частиц угля в почву), но также и другими факторами (автотранспорт).

Содержание урана в почвах довольно однородно и варьирует на уровне регионального фона, содержание тория незначительно выше фона. Th/U-отношение в почвах варьирует от 3,7 до 6,0, что свидетельствует об отсутствии загрязнения почв радиоактивными элементами [6].

Таким образом, достаточно определенно наблюдается корреляция содержаний рассмотренных элементов между компонентами окружающей среды: порода-уголь и порода-почва. Анализ химического состава золы углей позволяет заключить, что в отношении Zr, Th, Ni, сжигание угля с использованием современных промышленных способов с эффективными системами золоулавливания не будет представлять реальной экологической опасности, однако может представлять опасность при сжигании другими способами, например, в угольных печах на территории частного сектора. Следует обратить внимание на повышенное содержание Ni в золе углей, данные о выщелачивании которого, из золоотвалов противоречивы [8]. Кроме того, по собственным данным известно, что уран может легко выщелачиваться из золоотвалов, загрязняя прилегающие территории [4].

Таблица 1. Химический состав коренных пород и золы каменного угля

Элемент	Верхняя пачка (n = 4)	Средняя пачка (n = 4)	Нижняя пачка (n = 3)	Кларк золы каменных углей [8]	Коренные породы (n = 5)	Кларк осадочных пород [8]
B	155 ± 13	235 ± 155	165 ± 49	260 ± 20	37,4 ± 6,7	72
Mn	174 ± 53	207 ± 111	253 ± 67	430 ± 30	374 ± 282	830
Ni	**203 ± 75**	**189 ± 153**	**212 ± 184**	100 ± 5	**76 ± 25**	37
Cu	68 ± 12	67 ± 43	82 ± 41	110 ± 5	27,2 ± 9,5	31
Zn	77 ± 46	47 ± 40	193 ± 97	170 ± 10	**95 ± 30,4**	43
Ge	10,2 ± 7,1	7,0 ± 3,6	17,2 ± 16,8	18 ± 1	–	1,4
Sr	372 ± 149	300 ± 87	408 ± 266	730 ± 50	115 ± 19	270
Zr	**458 ± 208**	**300 ± 87**	**680 ± 298**	230 ± 10	**266 ± 23**	170
Mo	5,9 ± 2,9	6,3 ± 3,4	14,6 ± 7,7	14 ± 1	–	1,5
Ag	0,14 ± 0,09	0,16 ± 0,07	0,31 ± 0,08	0,63 ± 0,1	**0,86 ± 0,15**	0,12
Cd	0,28 ± 0,15	0,41 ± 0,38	0,62 ± 0,10	1,2 ± 0,3	0,13 ± 0,08	0,8
Sn	5,6 ± 2,5	4,5 ± 3,3	11 ± 2,7	8,0 ± 0,4	2,84 ± 0,61	2,9
Ba	258 ± 29	245 ± 19	300 ± 113	980 ± 60	**582 ± 56**	410
Tl	1,4 ± 0,7	1,4 ± 0,9	4,0 ± 1,5	4,6 ± 0,4	**1,16 ± 0,11**	0,89
Pb	37 ± 30	44 ± 35	75 ± 23	55 ± 6	**19,2 ± 2,5**	12
Th	**48 ± 19**	25 ± 10	**49 ± 32**	23 ± 1	**12,0 ± 3,4**	7,7
U	15,9 ± 5,1	10,7 ± 2,2	18,9 ± 11,6	15 ± 1	3,0 ± 1,4	3,4

n – число проб.

Таблица 2. Химический состав почв территории угольного месторождения, мг/кг

Химический элемент	Бурозем грубогумусовый		Среднее содержание в почвах месторождения (n = 10)	Региональный фон [3]	Кларк [9]
	OY	BM			
B	24	31	27 ± 3,9	–	42
Mn	2335	989	999 ± 59	915–1200	411–550
Ni	46	52	44 ± 5,8	43–44	13–37
Cu	18	30	27 ± 7	42–51	14–109
Zn	62	110	93 ± 16	84–93	60–89
Ge	0,9	1,5	1,2 ± 0,3	–	2,0 (0,5–2,5)
Sr	214	211	207 ± 12	208–277	130–240
Zr	219	240	221 ± 17	–	70–200
Mo	0,5	0,8	0,6 ± 0,2	–	1,1 (0,9–1,8)
Ag	0,30	0,18	0,15 ± 0,06	0,5	0,13
Cd	0,22	0,12	0,22 ± 0,06	–	0,41 (0,2–1,1)
Sn	2,4	3,5	3,2 ± 0,5	–	2,5
Ba	780	630	594 ± 14	–	362–580
Hg	0,030	0,012	0,019 ± 0,002	–	1,1
Tl	1,3	1,8	2,2 ± 0,6	–	0,5 (0,014–2,8)
Pb	19	22	24 ± 18	10	27
Th	8,7	9,4	9,6 ± 0,4	6,06–6,58	8,1–11
U	1,7	2,0	2,1 ± 0,4	1,90–2,01	1,9–4,4

Заключение

Результаты проведенных исследований в районе разрабатываемого участка Головинского угольного месторождения Прибайкалья показали, что содержаниев золе рассматриваемых углей элементов-примесей в большинстве случаев не превышают кларка. Повышенное содержание установлено в отношении Ni, Zr и Th. Коренные породы содержат те же элементы в повышенной концентрации, что и зола углей. Достаточно определенно наблюдается корреляция содержаний рассмотренных элементов между компонентами окружающей среды: порода-уголь и порода-почва.

Изменение почвенного покрова на территории месторождения связано, прежде всего, с его механическим нарушениеми выходом на поверхность коренных пород.

Несмотря на повышенное содержание в углях Zr, Ni и Th, его сжигание современными промышленными способами с эффективными системами золоулавливания, по-видимому, не будет представлять серьезной экологической опасности для окружающей среды. Однако, необходимо обратить внимание на то, что золоотвалы могут загрязнять окружающую их территорию за счет выщелачивания из них некоторых элементов (например, урана).

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания Института геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН (ИГХ СО РАН) по проекту № 0284-2021-0003.

Авторы благодарны сотрудникам ИГХ СО РАН и ОАО «Иркутскэнерго», принимавших участие в работе.

Литература

1. Арбузов С. И. Геохимические исследования углей в Сибири / С.И. Арбузов, Л.П. Рихванов // Известия ТПУ, 2009. – № 1 (314). – С. – 96–100.
2. Атлас. Иркутская область. Экологические условия развития. Москва-Иркутск, 2004. – 90 с.
3. Гребенщикова В. И. Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон) / В. И. Гребенщикова, Э. Е. Лустенберг, Н. А. Китаев, И. С. Ломоносов (под ред. Кузьмина М. И.). – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2008. – 234 с.
4. Кузнецов П. В. Водная миграция радиоактивных элементов из золоотвала ТЭЦ-9 (Иркутская область) / П. В. Кузнецов, В. И. Гребенщикова // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы IV международной конференции. – Томск, 2013. – С. 313–315.
5. Михеева Е. А. Геохимические особенности черемховской свиты (Иркутский угольный бассейн) / Е. А. Михеева, Е. И. Демонтерова, А. В. Блинов // Актуальные проблемы науки Прибайкалья, 2020. – Вып. 3. – С. 143–147.
6. Рихванов Л. П. Эколого-геохимические особенности природных сред Томского района и заболеваемость населения / Л. П. Рихванов, Е. Г. Язиков, Ю. И. Сухих, Н. В. Барановская, В. Т. Волков, Н. Н. Волкова, В. В. Архангельский, Т. А. Архангельская, О. А. Денисова, А. Ю. Шатилов, Е. П. Янкович. – Томск: ООО изд-во «Курсив», 2006. – 216 с.
7. Соколов А. Д. Уголь в топливно-энергетическом балансе Иркутской области / А. Д. Соколов, Л. Н. Такайшвили, С. Ю. Музычук // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2017. – № 12 (21). – С. 185–194.
8. Юдович Я. Э. Ценные элементы-примеси в углях / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2006. – 538 с.
9. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants / A. Kabata-Pendias A.– CRC Press Taylor & Francis Group, 2011. – 505 p.

РОЛЬ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ И ПОИСКОВ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Ф. Д. Лазарев, П. В. Кирплюк, А. Н. Онищенко, Р. А. Леденгский

Норильский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ»
Норильск, Россия, lazarevfd@yandex.ru , kirpluk_pv@mail.ru, norandr2012@gmail.com, ledengskiyra@yandex.ru

THE ROLE OF GAVVA-SPECTROMETRY IN GEOLOGICAL MAPPING AND MINERAL EXPLORATION

F. D. Lazarev, P. V. Kirpluk, A. N. Onischenko, R. A. Ledengskiy

Norilsk branch of the FSBI «VSEGEI»
Norilsk, Russia, lazarevfd@yandex.ru , kirpluk_pv@mail.ru, norandr2012@gmail.com, ledengskiyra@yandex.ru

The article shows the leading role of gamma-spectrometry in geological mapping and mineral exploration, on the example of a factual material obtained as a result of an integrated airborne geophys-ical survey at a scale of 1 : 50 000, on the Rassoshinskaya area (The Sakha Republic (Yakutia)).

The methodical approach of prediction bases on a model of the radiogeochemical zonality of copper-porphyry systems, which is indicated in the fine structure of gamma-spectrometric fields.

Норильский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», являющийся структурным подразделением института, осуществляет полный комплекс современных аэрогеофизических работ и принимает непосредственное участие в создании комплектов Госгеолкарты-200 второго поколения. Со-временное аэрогамма-спектрометрическое оборудование, методические приемы производства полевых работ, программное обеспечение и разработанные методики обработки и интерпретации полевых материалов приводят к существенному обновлению геологических карт, выделению новых структур и перспективных объектов. Именно поэтому современная геофизическая основа (ГФО-200) обладает совершенно новой и уникальной первичной геологической информацией, способствующей более глубокому и качественному изучению геологического строения территорий и объективному выделению перспективных объектов.

В работе [4] на примере фактического материала, полученного в результате комплексной аэрогеофизической съемки масштаба 1:50 000 выполненной, в рамках Государственной программы регионального изучения недр по дополнительному геологическому изучению ранее заснятых площадей масштаба 1 : 200 000 (ГДП-200), на Рассошинской площади (республика Саха (Якутия), показаны современные возможности геофизических методов при решении задач геологического картирования и методический подход прогнозирования структур медно-порфирового типа, основанный на пространственной связи между развитием площадных метасоматических изменений и радиогеохимической специализацией горных пород.

Съемка выполнялась на легком вертолете Eurocopter AS350-B3, на котором были смонтированы аэрогамма-спектрометр RS-500 (RSX-4) с объемом детектора 32 л, аэромагнитометр ГТ-МАГ с частотой регистрации 100 Гц, а также внефюзеляжное устройство – «носовой стингер» – для крепления магнитометрического датчика Cs-3, радиовысотомера TRA-3500 и нави-гационных антенн на базе приемников «NovAtel OEMStar».

Обработка аэрогеофизического материала была выполнена с применением программного комплекса Oasis Montaj, при этом гамма-спектрометрические данные обрабатывались по методике МАГАТЭ. В результате получен материал высокого качества, в т. ч., суммарная мощность экспозиционной дозы, содержания урана, тория, калия и аномальное магнитное поле.

В структурно-тектоническом отношении, изучаемая площадь расположена на сочленении Омулевского антиклинория и Арга-Тасского аккреционного блока. Это сложно построенная структура, характеризующаяся многоярусным строением, многообразием слагающих ее полифациальных комплексов, широким развитием чешуйчатых надвигов. Восточная часть площади перекрыта современными отложениями Зырянской впадины. В пределах площади размещаются небольшие штоки гранитоидов, наиболее крупным из которых является Рассошинский интрузив поздне-юрского возраста.

Гамма-спектрометрические поля Рассошинской площади отличаются высокой контрастностью и информативностью. Более 70 % ее площади выполнено геологическими образованиями разной степени радиоактивности, на фоне которых не радиоактивные участки тоже достаточно хорошо сопоставляются с геологическими телами (Рис. 1).

В результате районирования на основе комплекса геофизических полей, в т. ч. суммарной мощности дозы гамма-излучения и трансформант потенциаль-

ных полей получена карта весьма точно отражающая структурно-тектоническое строения изучаемой территории и положение основных геологических образований.

Последующий анализ АГСМ-данных на базе корреляционных методов преобразования (алгоритм АРК) позволил локализовать участки с аномальными концентрациями ЕРЭ, обусловленными породными особенностями и наложенными процессами, а также определить радиогеохимическую зональность и специализацию геологических образований (рис. 3-а). Наиболее контрастно зональность проявляется в гамма-эквивалентах концентраций естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) на основе оценки вклада каждого элемента (уран, торий, калий) в общую гамма-активность горных пород. Ее суть заключается в том, что каждый из фиксируемых радиоактивных элементов имеет свой гамма-эквивалент, то есть мощность экспозиционной дозы, образованной одной единицей содержания. Значение гамма-эквивалента соответствует мощности дозы от единицы содержания радионуклида на высоте 1 м от излучающей поверхности и зависит от условия насыщенного полупространства [6].

Комплексная интерпретация полученных в результате аэрогеофизической съемки физических полей основана на сопоставлении последних с имеющимися геологическими данными и установлении определенных связей между особенностями геологического строения изучаемой территории и характером рассматриваемых полей. Помимо решения традиционных вопросов о тектоническом строении территории, составлена геологическая схема, отражающая достаточно детальное формационное строение площади (рис. 3-б).

Основные результаты комплексной интерпретации геофизических данных Рассошинской площади сводятся к следующему:

1. Особенности геологического строения нашли закономерное отражение во всех геофизических полях, но наиболее информативными являются АГСМ-данные.

2. Вулканогенно-осадочные образования разделяются на стратиграфические таксоны:

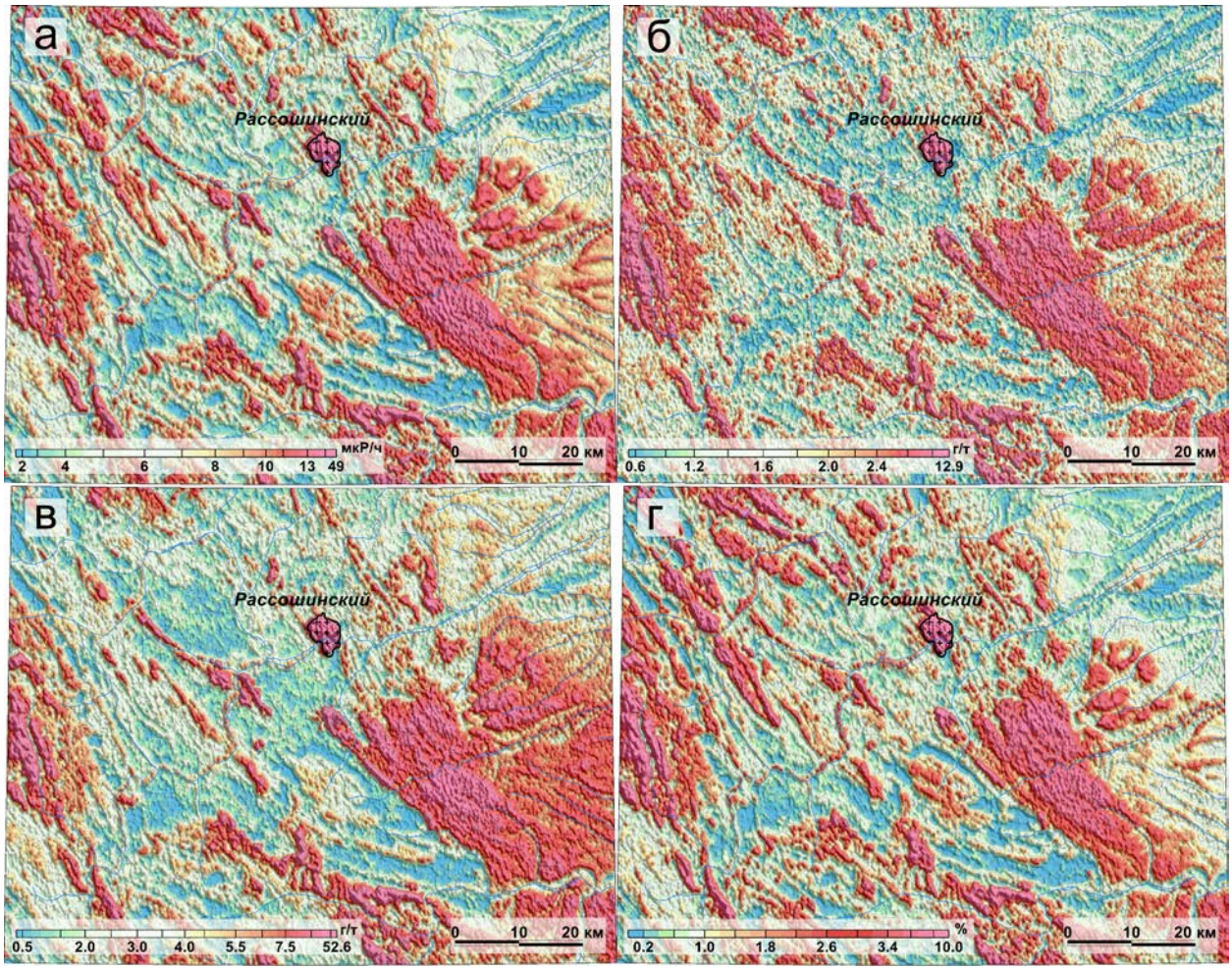


Рис. 1. Карты гамма-спектрометрических полей (Рассошинская площадь)

а) суммарная мощность экспозиционной дозы; содержания ЕРЭ; б) урана; в) тория; г) калия.

• верхнеюрская илиньтасская свита характеризуется высокими содержаниями всех трех ЕРЭ (до 25 мкР/ч) с уран-ториевой и калий-ториевой специализацией пород;

• нижнепалеозойские отложения отличаются повышенной радиоактивностью (15–20 мкР/ч) и существенно калиевой специализацией пород;

• для верхнепалеозойских образований характерны низкие содержания ЕРЭ без явно выраженной специализацией пород.

3. Девонские терригенно-карбонатные отложения характеризуются низкими содержаниями ЕРЭ и существенно урановой радиогеохимической специализацией.

4. Плиоценовые отложения, слагающие поверхности высоких цокольных террас отчетливо выделяются радиоактивностью на уровне 8–12 мкР/ч, торий-калиевой специализацией и характерной формой конуса выноса среди образований Зырянской депрессии.

5. Для кайнозойских образований Зырянской депрессии характерны низкие содержаний ЕРЭ и преимущественно ториевая специализация пород.

6. Рассошинский гранит-гранодиорит-диоритовый комплекс отмечается высокоинтенсивными (до 40 мкР/ч) радиоактивными аномалиями. Наиболее крупный массив – Рассошинский имеет преимущественно уран-ториевую специализацию, тогда как для других более мелких гранитных массивов характерна торий-калиевая.

Рассматриваемая площадь, по результатам предыдущих исследователей [5], перспективна на медно-порфировое оруденение. Это послужило основанием сотрудникам Норильского филиала заострить внимание на локализации таких объектов при геологической интерпретации аэрогеофизических данных.

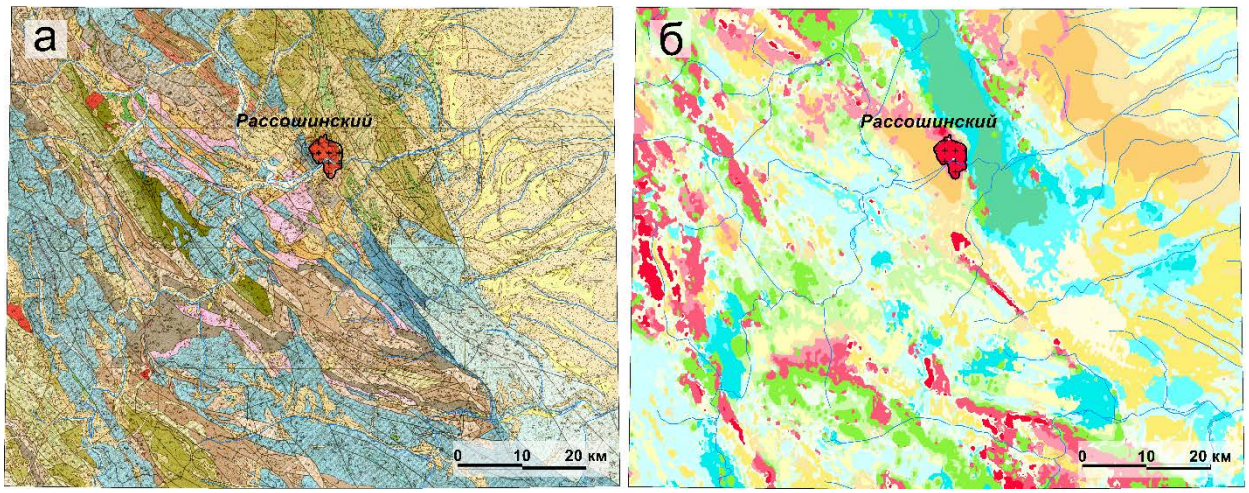


Рис. 2. Сопоставление схемы районирования геофизических полей с ГГК-200/1

а) геологическая карта (ГГК-200/1); б) схема районирования геофизических полей.

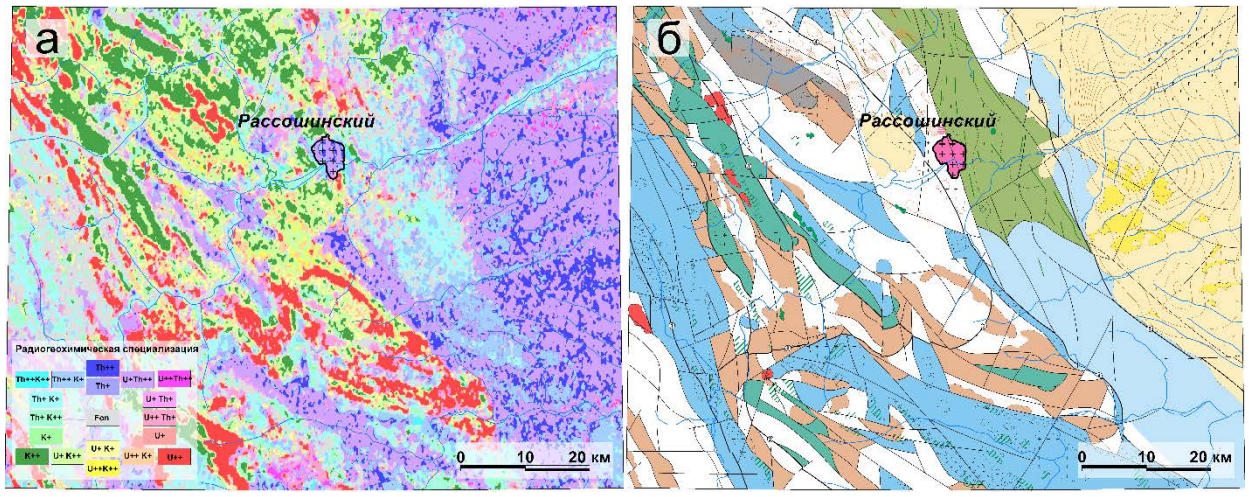


Рис. 3. Результаты комплексной геолого-геофизической интерпретации

а – сводная радиогеохимическая карта (АРК); б – схема комплексной интерпретации.

В предыдущие годы, специалистами этого филиала, в процессе аэрогеофизических съемок в районах размещения известных медно-порфировых месторождений: Быстринское, Колтуминское, Шахтаминское, Бугдаинское (2007, 2008 г.), Ак-Суг (2010 г), Песчанка (2011 г), бы-ла фактически установлена прямая пространственная связь между развитием площадных метасоматических изменений и радиогеохимической специализацией пород, отражающаяся в тонкой структуре гамма-спектрометрических полей. Такая связь и легла в основу модели радио-геохимической зональности медно-порфировых систем (Рис. 4), представленной главным геофизиком Норильского филиала Кирплюком П. В. в 2017 г. на научно-практической конферен-ции в Москве, а затем в 2018 г. на 10 международном конгрессе в Красноярске [1, 2, 3]. Она также обсуждалась в 2020, 2021 гг. в стенах ФГБУ «ВСЕГЕИ» на конференциях, посвященных вопросам повышения эффективности аэрогеофизических работ.

Согласно радиогеохимической зональности медно-порфировой системы, в зависимости от эрозионного среза будет проявлена соответствующая ее часть, по которой, при наличии других благоприятных геофизических признаков (локальное понижение гравитационного поля и положительная или отрицательная аномальная структура магнитного поля) можно делать за-ключение о степени перспективности объекта. Поэтому пространственное совпадение радио-геохимических и магнитных аномалий с локальной отрицательной аномалией поля силы тяжести может указывать на вероятность существования рудно-магматической системы.

В процессе интерпретации аэрогеофизических материалов съемки 2018 г. на Рассошинской площади, в непосредственной близости к северо-западу от Рассошинского интрузива, была выявлена гамма-спектрометрическая аномалия с явным преобладанием калия (Рис. 5-а, б).

По данным геологической карты первого поколения, центральная часть этого интрузива сложена крупно- и среднезернистыми гранитами, участками порфировидных, переходящих к периферии в более мелкозернистые разности. На экзоконтакте отмечаются зоны пиритизации, выявлены шлиховые ореолы меди и свинца.

В геофизических полях интрузив отображается высокоинтенсивной радиогеохимической аномалией до 40 мкР/ч, уран-ториевой специализацией (Рис. 5-а, б, в) и локальными магнитными аномалиями разной интенсивности (Рис. 5-г). Поскольку современный эрозионный срез собственно Рассошинского интрузива характеризуется уран-ториевой радиогеохимической специализацией, то он согласно ранее отмеченной модели, соответствует уровню с молибденитовой минерализацией. При проведении полевых геологических и геохимических работ в 2017–2018 гг., в его пределах действительно были

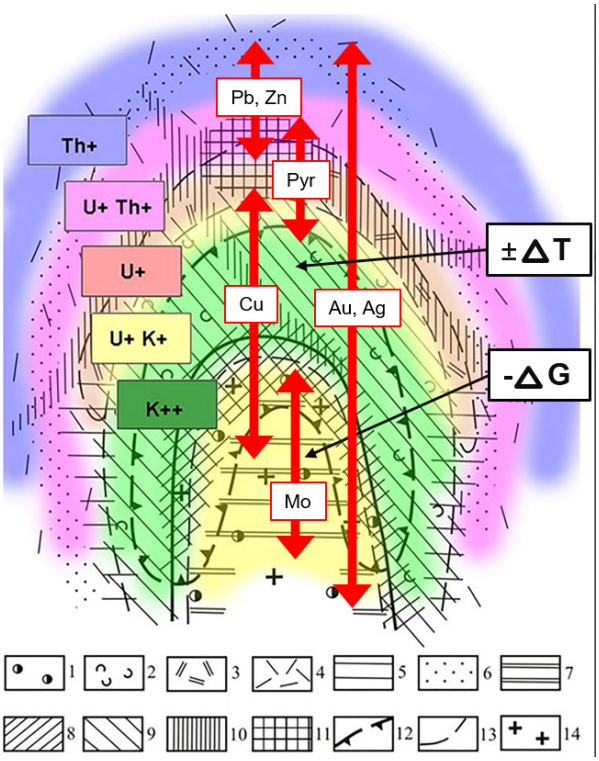


Рис. 4. Модель радиогеохимической зональности медно-порфировой системы

1–4 – гидротермально-метасоматические изменения: 1 – калиево-кремниевые, 2 – окварцевание, хлоритизация, серицитизация, 3 – аргиллизация, 4 – пропилитизация; 5–11 – типы руд: 5–6 магнетит-пиритовый, 7 – молибденитовый, 8 – халькопирит-борнитовый, 9 – пирит-халькопиритовый, 10–11 – полисульфидный; 12 – контуры рудных тел, 13 – границы зон метасоматически измененных пород, 14 – рудоносный порфировый интрузив.

обнаружены проявления молибдена с содержанием до 0,2 %, а в экзоконтактовой части массива видимое золото с содержанием до 105 г/т.

В магнитном поле калиевая аномалия совпадает с интенсивной локальной положительной аномалией. Эти аномалии локализуются в области отрицательных значений гравитационного поля северо-западного простирания (рис. 5-д), южная часть которой сопряжена с выходом Рассошинского интрузива на дневную поверхность (рис. 5-е).

Поскольку эпицентр и плановая конфигурация калиевой аномалии совпадает с локальной магнитной аномалией, то это указало о возможном наличии единого аномалеобразующего объекта – невскрытой части Рассошинского гранитоидного интрузива, с сохранившимися контактовыми изменениями в надинтрузивной зоне.

Сочетание выше отмеченных геофизических признаков, характерных для гидротермально-метасоматических объектов, с наличием шлиховых ореолов меди и свинца позволило сделать предположение о вероятном присутствии слабо эродированной гидротермальной рудно-магматической системы

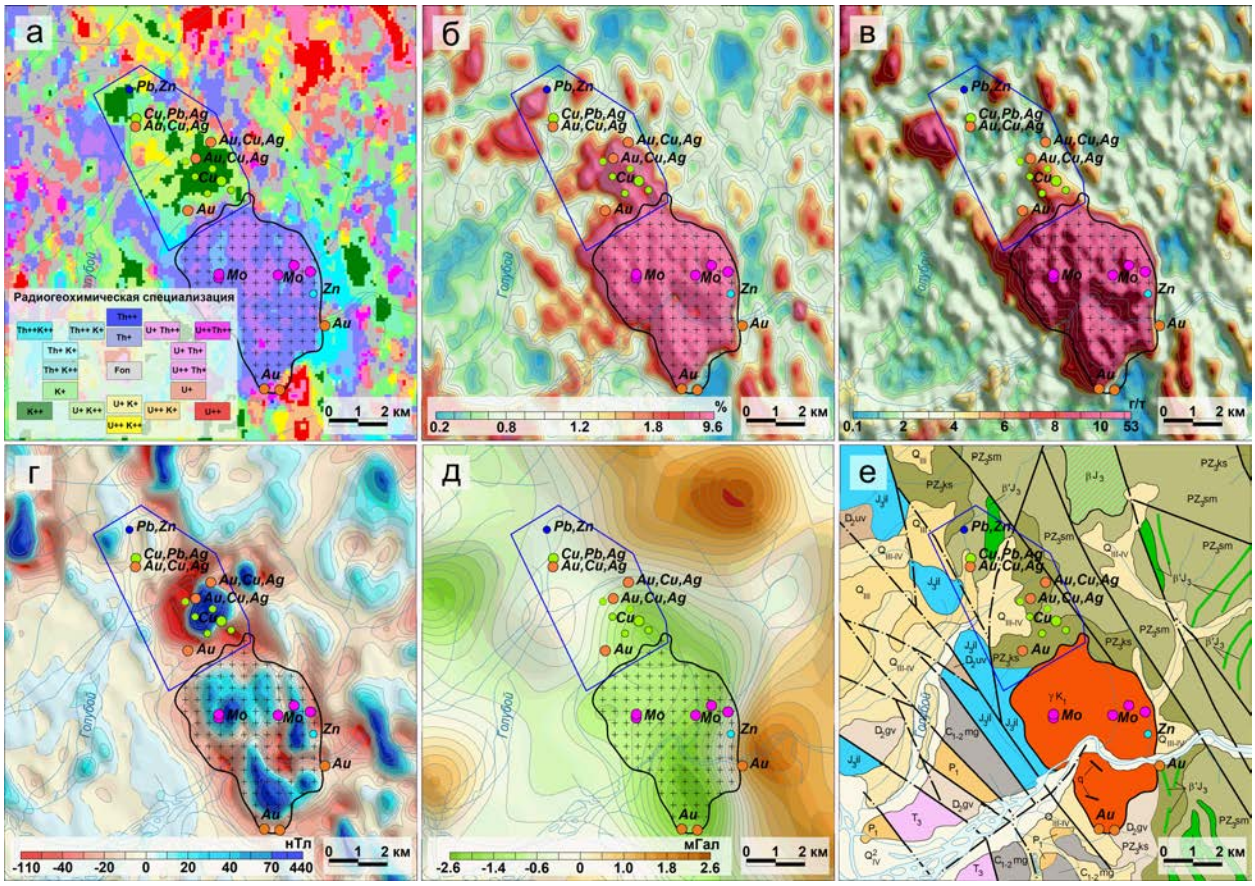


Рис. 5. Положение участка «Рассошинский» в геофизических полях

а) радиогеохимическая зональность; б) содержания калия; в) содержания тория; г) локальная составляющая магнитного поля; д) локальная составляющая поля силы тя-жести; е) геологическое строение.

и наметить здесь участок «Рассошинский» для постановки наземных геолого-геофизических работ с целью его изучения и получения фактов, подтверждающих гипотезу. Участок расположен в пределах северо-западного фланга интрузива на контакте с верхнепалеозойскими вулканогенно-осадочными отложениями толщ.

Таким образом, интерпретация аэрогеофизических материалов на Рассошинской площади, в первую очередь, гамма-спектрометрических, позволила:

- уточнить геологическое строение площади, в том числе разделить по радиогеохимическим данным разновозрастные однотипные вулканогенно-осадочные образования на таксоны согласно легенды к геологической карте масштаба 1 : 200 000;
- уточнить плановое положение Рассошинского интрузива и элементы его внутренненго строения, определить его уран-ториевую специализацию и высказать предположение о уровне эрозионного среза, соответствующего молибденитовой минерализации в медно-порфировой системе;
- выделить перспективный участок на медно-порфировое оруденение.

Дальнейшее изучение выявленного объекта путем проведения наземных геофизических работ было направлено на уточнение границ аэрогеофизических аномалий, их связи с контактовыми и метасоматическими процессами, проверку обоснованности прогнозных построений, оценку перспективности участка на медное, молибденовое и золотое оруденение. Работы выполнялись в масштабе 1 : 25 000 и включали гамма-спектрометрию, магнитометрию, электроразведку, а также геологические маршруты с отбором штуфных проб.

На первом этапе для определения качества полевого материала выполнено сопоставление результатов наземных работ с данными АГСМ-50, которое показало хорошую согласованность распределения естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ). Несмотря на существенные методические различия в их получении, коэффициенты корреляции составили: для урана – 0,73; тория – 0,75; и калия – 0,88 и хорошо сопоставляются по абсолютным значениям, что сви-детельствует о высоком качестве полевого материала, как воздушного, так и наземного (Рис. 6).

Северо-западная граница Рассошинского массива контрастно отражается в радиогеохимических полях у южной границы участка. Для него характерны высокоинтенсивные аномалии суммарного гамма-излучения и высокие содержания всех трех ЕРЭ (Рис. 7). Наиболее чет-ко границы выходов ком-

плекса фиксируются в полях содержания калия (до 7 %) и максимальными содержаниями тория (до 30 • 10^{-4} %). По геологическим данным верхняя часть массива разбита на мелкие блоки, которые по тектоническим нарушениям северо-западного простирания выдвинуты в глубь изучаемого участка на различное расстояние относительно друг друга (Рис. 7, б).

Зоны калиевой специализации отражают положение участков максимального проявления гидротермально-метасоматических процессов. При общем совпадении контуров калиевой доминанты в аэро- и наземной съемках, детальность последних значительно выше. Это обеспечивает более компактную локализацию перспективных объектов, что подтверждается полевы-ми геологическими наблюдениями.

Наиболее крупная зона существенно калиевой специализации выделяется в контуре надинтрузивной части невскрытого гранитного массива. Далее эта зона фрагментарно прослеживается в северо-западном направлении и заканчивается у северо-западной границы площади. Она целиком находится в поле локальной отрицательной аномалии поля силы тяжести и вероятно является более глубинным продолжением Рассошинского интрузива и отражает плановое положение измененных пород гидротермально-метасоматическими процессами. В южной части эта калиевая аномальная зона совпадает с положительной магнитной аномалией и в целом располагается в зонах повышенной проводимости и поляризуемости.

Присутствие медного и полиметаллического оруденения на изученном участке подтверждается выявленными здесь в ходе заверки 27 пунктами минерализации в коренном залегании. Из наиболее перспективных отобрано 12 штуфных проб.

Рудные тела представлены кварцевыми и кварц-карбонатными жилами мощностью до 0,6 м с сульфидной минерализацией до 30 %. Рудные минералы в большинстве своем представ-лены малахитом, азуритом, халькопиритом, борнитом, ковеллином, галенитом и сфалеритом. Установлен пункт минерализации сплошных халькопиритовых руд гнездового типа в кварцевой жиле в сочетании с фрагментом рудного штокверка (кварц-халькопиритовые прожилки в кварците).

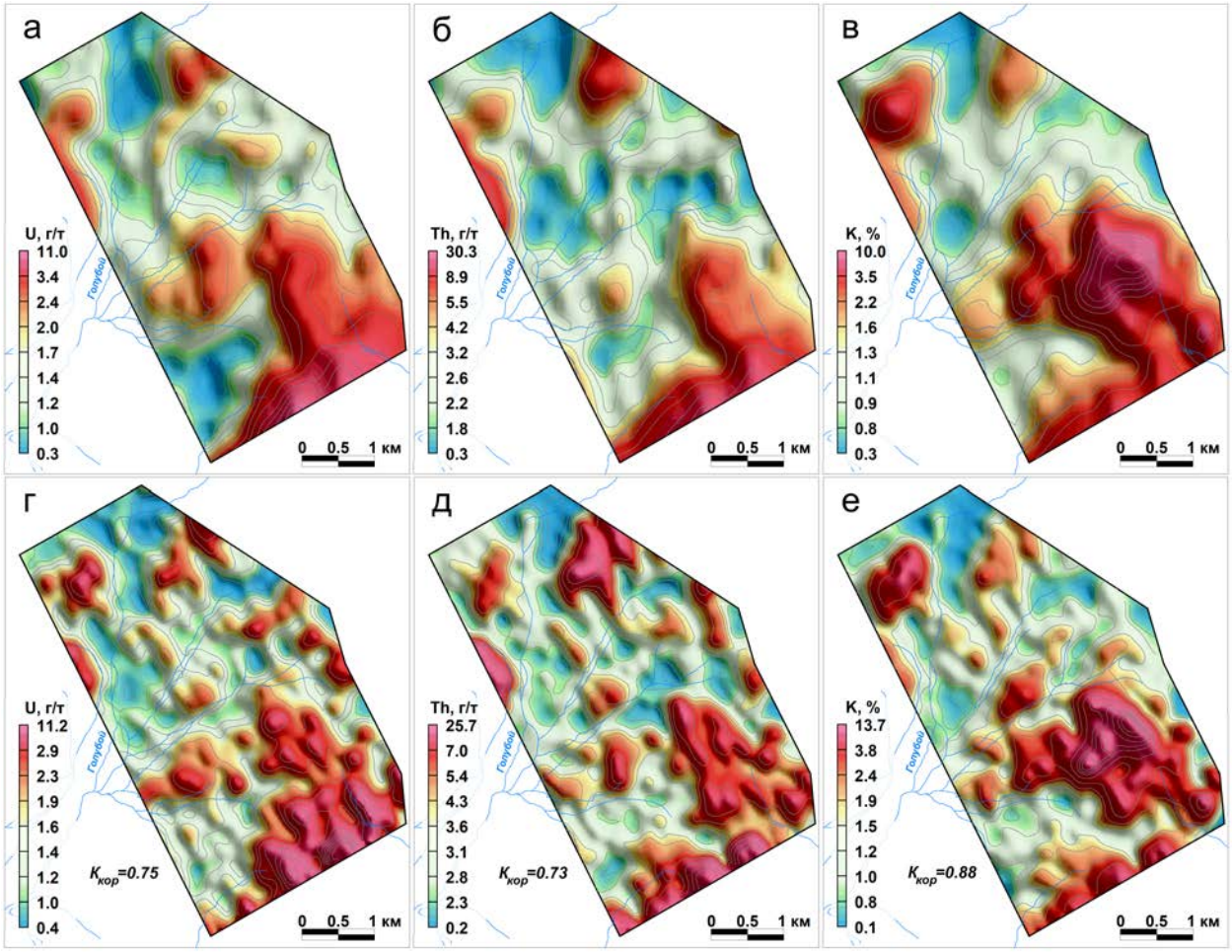


Рис. 6. Сравнение материалов гамма-спектрометрических съемок (уч-к «Рассошинский»)

а, б, в – содержания U, Th, K по данным аэросъемки, масштаб 1 : 50 000 (2018 г.); г, д, е – содержания U, Th, K по данным пешеходной съемки, масштаб 1 : 25 000 (2019 г.).

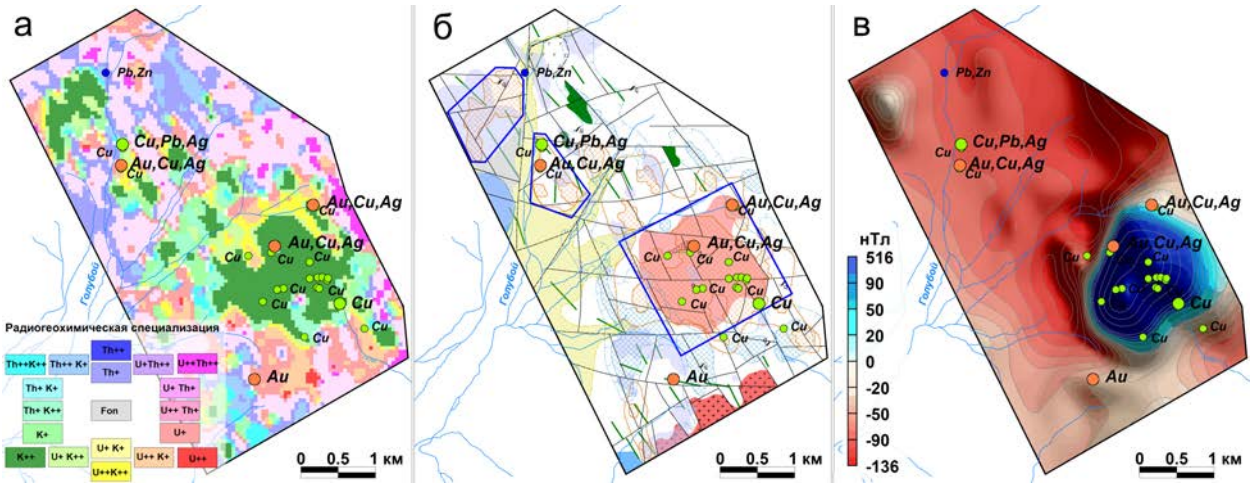


Рис. 7. Результаты геологической интерпретации

а) сводная радиогеохимическая карта; б) схема геологической интерпретации; в) аномальное магнитное поле.

В ходе аналитических исследований штуфных проб в лабораториях ФГБУ «ВСЕГЕИ» установлены повышенные содержания золота (до 3,33 г/т), серебра (до 210 г/т), меди (до 33 %), молибдена (до 116 г/т), свинца (до 4,4 %), цинка (до 1,1 %), бария (до 24,67 %).

В результате наземных геолого-геофизических работ, проведенных в пределах «Рассо-шинского» участка зафиксировано наличие золото-медно-полиметаллического оруденения на площади 2,3 кв. км, соответствующего рангу рудного поля. Здесь прогнозируется крупный объект медно-порфирового типа, представленный надинтрузивной зоной невскрытого гранитного массива рассошинского комплекса с широко проявленными контактово-метасоматическими процессами.

Прогнозируемое рудное поле в плане имеет изометричную форму с диаметром около 1500 метров. По результатам моделирования магнитного поля в программном модуле PotenQ, Geosoft, верхняя кромка интрузива сильно изрезана, со средней глубиной залегания 100 метров. Вертикальная мощность прогнозируемого оруденения изменяется в пределах 50–250 метров. Выявленные параметры рудного поля позволяют прогнозировать ресурсы меди в 5 млн. тонн, при среднем содержании 1 % и золота – 100 т, при среднем содержании 2 г/т. В пределах этого рудного поля выделен перспективный участок первой очереди. На нем рекомендуется оценочная стадия работ, включающая литохимическое опробование по первичным ореолам, горные работы и поисковое колонковое бурение.

Таким образом, в современных условиях данные гамма-спектрометрической съемки обеспечивают не только эффективное решения задач геологического картирования, но и выходят на ведущее место в прогнозировании и поисках гидротермально-метасоматического оруденения.

Литература

1. Кирплюк П. В. Радиогеохимические признаки медно-порфирового оруденения / Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений благородных, цветных металлов и алмазов: Тез. докл. VII научно-практической конференции. – Москва, ЦНИГРИ, 2017. – С 22–23.
2. Кирплюк П. В. Радиогеохимические признаки медно-порфирового оруденения/ Цветные металлы и минералы // Золото Сибири: Тез. докл. 10 международного конгресса. – Красноярск, 2018 – С. 1209–1210.
3. Кривцов А. И. и др. Медно-порфировые месторождения. – Москва, ЦНИГРИ, 2001.
4. Лазарев Ф. Д., Кирплюк П. В., Онищенко А. Н. Прогнозирование рудно-магматических систем на основе аэрогеофизических данных при ГДП-200 // Разведка и охрана недр, 2021. – № 4. – С. 26–34.
5. Петров О. В., Киселев Е. А., Шпикерман В. И., Змиевский Ю. П. Прогноз размещения месторождений золото-медно-порфирового типа в вулкано-плутонических поясах восточных районов России по результатам работ составления листов Госгеолкарты-1000/3 // Региональная геология и металлогения, 2019. – № 80. – С. 50–73.
6. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. J.-P. Nicolet, Erdi-Krausz, G., IAEA, Vienna, Austria, 2003. – P. 173.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ Th, U, Mo, Mn, Fe, Ni, Cu, As В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ СОЛЁНОГО ОЗЕРА

Е. В. Лазарева[1], С. М. Жмодик[1], А. В. Брянская[2], Б. Ю. Сарыг-оол[1], И. С. Кириченко[1]

[1]Институт геологии и минералогии СО РАН
Новосибирск, Россия, lazareva@igm.nsc.ru
[2]Институт цитологии и генетики СО РАН
Новосибирск, Россия, bal412003@mail.ruc

DISTRIBUTION OF Th, U, Mo, Mn, Fe, Ni, Cu, As IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE SALT LAKE

E. V. Lazareva[1], S. M. Zhmodik[1], A. V. Bryanskaya[2], B. Y. Sarug-ool[1], I. S. Kirichenko[1]

[1]V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
Novosibirsk, Russia, lazareva@igm.nsc.ru
[2]Institute of Cytology and Genetics of the SB RAS
Novosibirsk, Russia, bal412003@mail.ruc

The results of a comprehensive study of the bottom sediments of Lake Solenoe are discussed in the article. Some layers of the bottom sediment are enriched in U, Mo, Mn, Ni, Cu, As. The composition of the microbial community varies significantly with depth. There is no entry of elements from the outside into the lake system, therefore, microorganisms may be responsible for the redistribution of elements.

Введение

В последние годы резко возросло количество публикации, посвященных описанию Au–Pt оруденения в черных сланцах в связи с обнаружением крупных комплексных месторождений Ni, Mo, Cu, Au, PGE и др на юге Китая, в Канаде, Замбии. Месторождения фиксируются в углеродистых отложениях, формирование которых происходило в различных геодинамических обстановках: активные и пассивные континентальные окраины, задуговые и внутриконтинентальные бассейны. В качестве причин возникновения высоких концентраций и источников металлов рассматриваются: морская вода, гидротермальные системы, растворенный и дисперсный материал, снесенный с континентов, а также импактные события. Не все углеродистые отложения, сформированные в перечисленных обстановках можно отнести к металлоносным, большая часть по геохимическим характеристикам относятся к рядовым морским осадкам. Во многих случаях собственно руды представлены маломощными горизонтами от первых сантиметров до 20–30 см, в редких случаях, увеличиваясь в складках до 1–2 метров (месторождения Ю. Китая, цехштейны в Польше и Германии, ураноносные сланцы Швеции, Финляндии и др.) [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Но распространены рудные горизонты внутри серий металлоносных черных сланцев на значительных территориях. Следовательно, событие, приведшее к формированию рудных горизонтов, было кратковременным и проявленным в глобальном или региональном масштабе.

Хорошо известно, что Fe, U и Mo обогащены верхние слои органо-содержащих осадков морей [7, 8, 9]. Однако, помимо абиотических процессов, в верхних слоях осадков активно протикают и микробиологические реакции. Для некоторых металлоносных образований, разрабатывающихся как Ni–Mo–PGE–Au руды, геохимическими данными по изотопному составу Mo и ЭПГ и распределению REE показано, что рудные элементы были сконцентрированы из морской воды [3].

На юге Западной Сибири сосредоточено большое количество озёр Mg–Na–Cl и Mg–Na–SO_4–Cl состава. На данной территории в течение длительного периода (Selandian, около 60 млн. лет – Eocene-Oligocene, около 34,9 млн. лет) существовало Западно-Сибирское внутреннее море, после высыхания которого были сформированы озёра. Воды озёр нейтральные и слабощелочные (6,5 < pH < 8,5), содержат значительные концентрации B, Br, I, Li, Sr [10, 11]. Солёные щелочные озёра являются также одной из немногих экосистем, в которых сохранились и успешно развиваются циано-бактериальные сообщества. В ходе проводимых исследований авторами были выявлены закономерности распределения элементов, которые позволяют рассмотреть механизмы накопления U, Mo, Ni, V, Cu, Zn в донных отложениях и объяснить возникновение высоких концентраций ряда элементов в морских осадках и, как следствие, в черносланцевых толщах, деятельностью микробных сообществ. Исследование позволяет рассматривать донные отложения солёных озёра как модельный объект морского бассейна на стадии деградации, доступный для изучения.

Материалы и методы

Для исследования выбрано оз. Солёное возле деревни Лепокурово (Купинский район, Новосибирской области 54°11'59,60"С, 78°10'16,64"В). Озеро характеризуется наличием ежегодно развивающегося циано-бактериального сообщества. В озере также обитает галофильный рачок *Artemia salina* [10, 11, 12]. Опробование донного осадка проводилось задавливанием пластиковой трубы диаметром 100 мм (рис. 1). После отбора образцов для микробиологических исследований к веществу, извлечённому из внутренней части осадка (кроме верхних 2х слоёв) добавляли дистиллированную воду дополнительно очищенную на установке Milli-Q, Millipore (с pH 7,3 и Eh ~ 400 mV) в пропорции 7,5 мл осадка/5 мл воды. В полученной суспензии измеряли pH и Eh. Оставшееся вещество герметично упаковывалось и в стационарных условиях из него отжимался поровый раствор (ПР). В растворе измеряли pH и Eh, далее его центрифугировали. Часть раствора вместе с коллоидом, представленным, в основном, органическим веществом, подкисляли конц. HNO_3. Вторая часть раствора сохранялась без подкисления для анализа на содержание анионов и углерода. Пробы с высоким содержанием $C_{орг}$ (слои 1, 2) предварительно окисляли HNO_3 и H_2O_2 с нагреванием под ИК-лампой в замкнутом объеме. Содержание элементов определялось методом ICP-MS, Сорг на анализаторе общего углерода MultiNC2100, Analitik Jena. Образцы плавающих цианобактериальных сообществ и донных отложений озера отбирали в стерильные 50 мл флаконы и фиксировали добавлением равного объема 96 % этанола. Образцы хранились при температуре –70 °С в коллекции культур ИЦиГ СО РАН. Выделение тотальной ДНК из образцов плавающего цианобактериального сообщества и донных отложений было осуществлено с помощью набора Genomic DNA from soil NucleoSpin® Soil (Macherey-Nagel) в соответствии с протоколом производителя. Для исследования закономерностей распределения элементов проведен анализ слэбов, вырезанных из колонки донного осадка, с шагом 1 мм, используя неразрушающее, высокоразрешающее сканирование РФА-СИ. Измерения проводились на станции коллективного пользования СЦСТИ (Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения в Институте ядерной физики СО РАН имени Г. И. Будкера), с помощью электронпозитронного накопителя ВЭПП-3. Данные о содержаниях элементов в объёмных пробах (отобранных через 1 см) использовались в качестве калибровочных стандартов.

Результаты и их обсуждение

В 2010 и 2011 годах Eh измененный в отжатых ПР был окислительный (100–300 mV) [10]. Однако верхние части донных отложений обогащены органическим веществом с отчётливым запахом сероводорода. Для оценки реальных условий в системе используют методики измерения, предполагающие изоляцию осадка от внешней среды [13]. pH измеренный в суспензии и ПР хорошо сопоставляются между собой (рис. 1), и с данными ранних исследований [10]. Результаты измерений Eh в пульпе (Eh^1) и выжатом ПР (Eh^2) в верхних 2х наиболее обводнённых слоях очень близки и показывают восстановительные условия (рис. 1). Однако, ниже 5 см от поверхности Eh^1 стабильно оказывался значительно ниже Eh^2: если в первом случае значения восстановительные, то о втором – окислительные (рис. 1).

В 2017 г. минерализация воды оз. Солёное составляла 113 г/л, в ПР из верхнего слоя осадка превышала 300 г/л, и далее вниз по разрезу варьировала от 50 до 100 г/л (рис. 1). В основном ионном составе преобладают Mg, Na, Cl и SO_4 (рис. 1). По сравнению с морской водой содержание Li, B, Si, Br, I сохраняется на том же уровне или сопоставимо, но большинства элементов значительно выше. Содержания Sc, Se, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, REE, Hf, Ta, Pb, Th, U в поверхностной воде, отжиме микробного сообщества и ПР донного осадка на 2, 3, 4 и даже 5 порядков выше, чем в современной морской воде. Содержание микроэлементов было выше в отжиме микробного сообщества (особенно Mn, Fe, Co, Zn, As, Sb, Y, REE, Pb, Th), чем в поверхностной воде. Содержания Mn, Fe, As в поровом растворе верхнего слоя донного осадка максимальное и резко снижаются с глубиной (рис. 1). По закономерности распределения в колонке донного осадка элементы можно разделить на 3 группы: (1) с равномерным распределением (V, Fe, Zn, K, Rb, Ti, Zr, Nb, Y); (2) демонстрирующие, в целом, равномерное распределение и имеющие отдельные узкие пики, в которых содержание увеличивается минимум в 2 раза (As, Ni, Cu); (3) с резко неравномерным распределением, образующие широкие пики (Mo, U, Mn, Ca, Sr) (рис. 1). Распределение Mn, Ca и Sr хорошо сопоставляется между собой. Повышенные концентрации As, Ni, Cu, ограничивают область, обогащенную Mo, U, Mn.

В ПР пики максимальных содержаний Fe и U не совпадают. По некоторым гепотезам Fe (III) в восстановительных условиях преоборазуется в более растворимый Fe (II), что контролируется глубиной проникновения O_2 [7]. U, напротив, растворим в присутствии O_2 и находится в виде UO_2^{2+}, а в восстановительной обстановке осаждается как UO_2 [14]. Согласно данной гипотезе окси-клин располагается в осадке оз. Солёное на глубине 35–38 см. Однако, подобное распределение элементов в растворе также объясняется деятельностью микроорганизмов [15], многие из которых определяют реакции окисления и/или восстановления элементов с переменной валентностью, в том числе U, Fe, Mn, Mo и т. д. [16]. Имеются данные о каталитическом восстановлении U (VI) на соединениях Fe (II) [17].

В плавающем цианобактериальном сообществе преобладали бактерии типа *Proteobacteria* (52,4 %) с доминированием класса *Gammaproteobacteria* (42,9 %) (рис. 1). На втором месте по численности находились *Cyanobacteria* (17,8 %), на третьем – *Bacteroidetes* (10,7 %). В верхних неконсолидированных слоях донного осадка преобладали те же типы бактерий и архей, что и в плавающем цианобактериальном сообществе. Резкая смена состава микробного сообщества наблюдается в уплотнённом осадке. В 2011 и 2017 годах состав сообществ отличается, но общие закономерности остаются близкими. В 2017 году на глубине 10–15 см резко возрастает (до 14,4 %) количество архей. В данном слое преобладающими типами бактерий являются *Proteobacteria* (26 %), *Gemmatimonadetes* (12,3 %) и *Firmicutes* (10,4 %), соответственно (рис. 1). В следующем слое донных отложений 15–18 см самыми многочисленными типами были *Proteobacteria* (34,3 %), затем *Gemmatimonadetes* (11,5 %) и *Chloroflexi* (9,9 %). По-прежнему велико было количество архей (11,1 %). *Superphylum Patescibacteria*, а также типы *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, *Planctomycetes* и *Caldatribacteriota* занимали долю от 2 до 5,3 %.

Соотношение U и Th в донных отложений оз Солёное сильно изменяется (рис. 2). В среднем по осадку содержания Th и U близко, наблюдаемому во многих осадочных континентальных и морских отло-

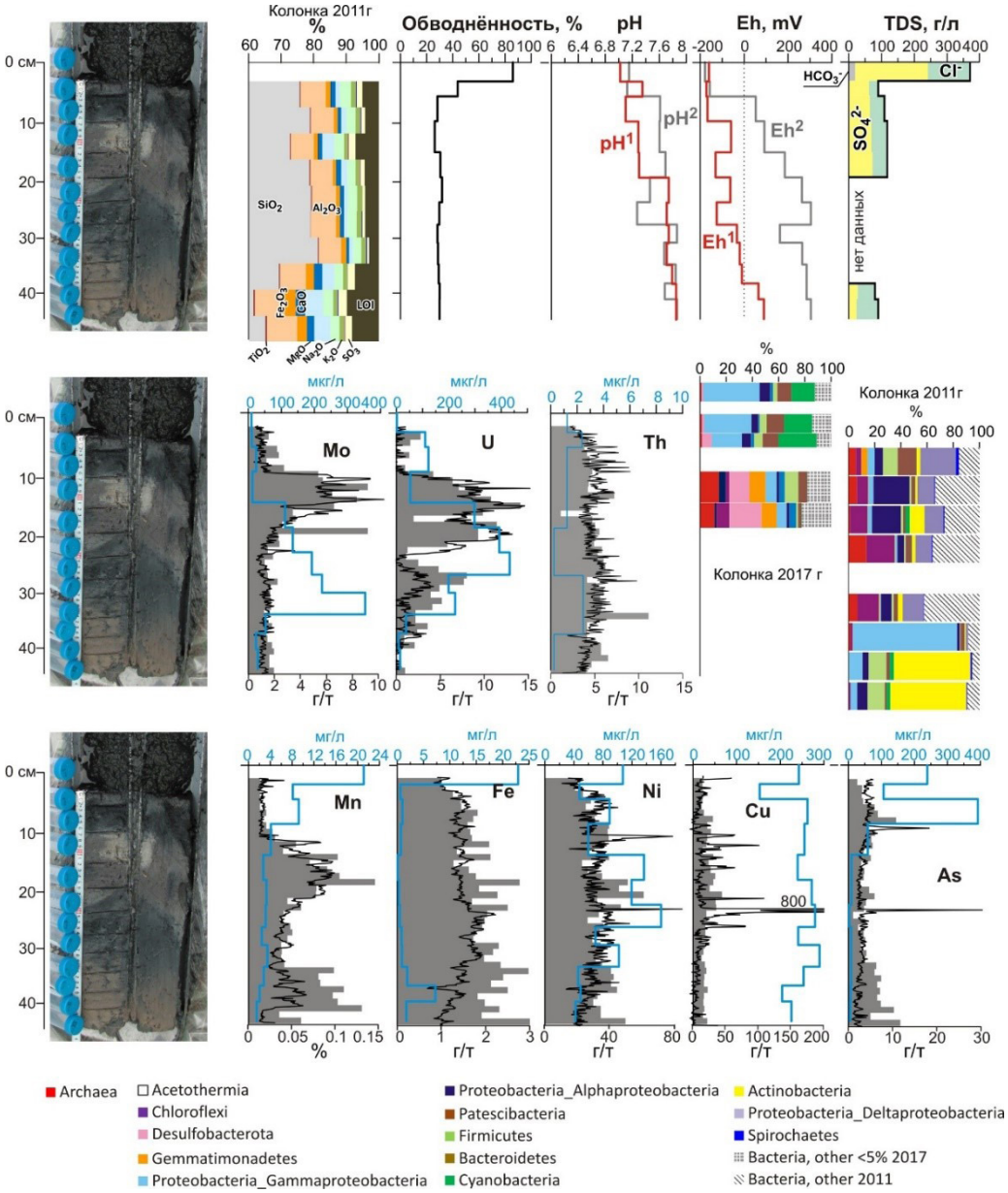


Рис. 1. Распределение Mo, U, Th, Mn, Fe, Ni, Cu, As в поровом растворе и твёрдом веществе донного осадка оз. Солёное, закономерности изменения pH и Eh с глубиной в пульпе (pH^1, Eh^1) и отжатом поровом растворе (pH^2, Eh^2), обводнённость, основной ионный состав порового раствора и состав микробного сообщества. Голубой линией на графике обозначно содержание элементов в поровом растворе

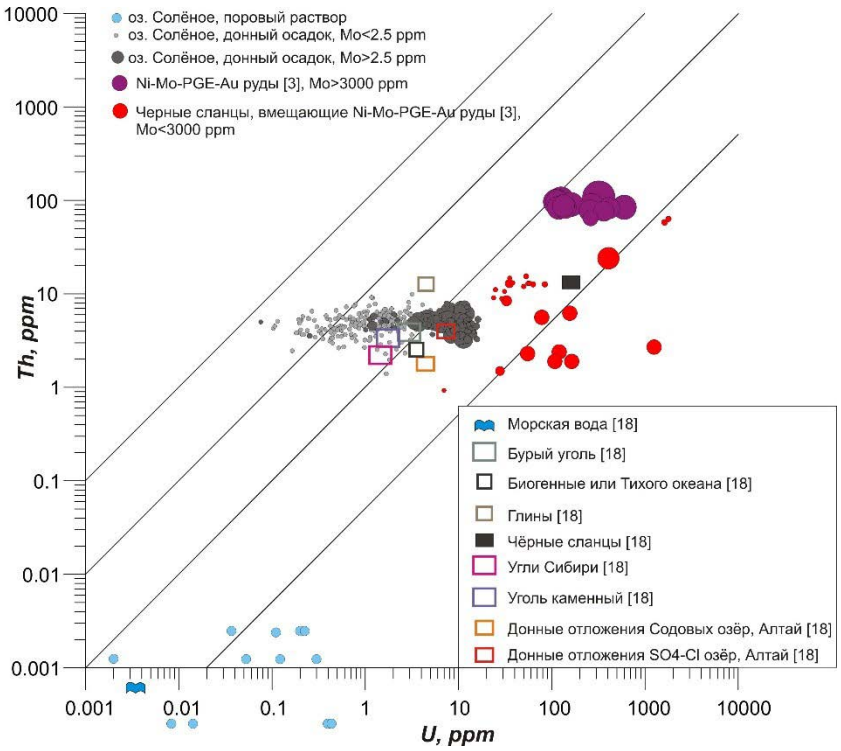


Рис. 2. Торий-урановое отношение в донных отложениях оз. Солёное, Ni–Mo–PGE–Au рудах, связанных с черносланцевыми отложениями и вмещающими их осадками [3] и некоторых типичных осадочных образованиях [18]. Относительный размер кружка указывает на различное содержание Mo в выборке

жениях (рис. 2). Но вся совокупность точек составов на графике U-Th образует тренд, по которому значительно меняется содержание U, при относительно небольшом изменении содержания Th. Подобная закономерность прослеживается и в ПР озера, и в богатых Ni–Mo–PGE–Au рудах, связанных с черносланцевыми толщами, и во вмещающих их породах (рис. 2).

Заключение

В реальных осадках могут реализовываться многие процессы, приводящие к накоплению элементов, но в случае оз. Соленое, деятельность микроорганизмов вносит максимальный вклад в распределения элементов в донном осадке. Известно, что V, Mo, W, Mn, Fe, Co, Ni, Cu и Zn служат осмотическими регуляторами, структурным клеем и каталитическими центрами сотен клеточных реакций. Более одной трети всех описанных ферментов являются металлоферментами и перечисленные элементы выполняют важные функции в метаболизме бактерий. Микроорганизмы в свою очередь являются основными агентами в круговороте C, H, N, O и S на поверхности Земли. В донных осадках оз. Солёное отдельные слои обогащены Mo, U, Mn, Ni, Cu As. Большинство из этих элементов характерны для различных металлоферментов, что позволяет рассматривать донные отложения озера как модельный объект для исследования закономерностей накопления элементов в осадках стагнирующих морских бассейнов и черносланцевых отложениях.

Работы выполнены в рамках государственного задания ИГМ СО РАН им. В. С. Соболева.

Литература

1. Жмодик С. М. Золотоконцентрирующие системы офиолитовых поясов (на примере Саяно-Байкало-Муйского пояса) / С. М. Жмодик, А. Г. Миронов, А. С. Жмодик. – Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2008. – 304 с.
2. Mao J. Major types and time–space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings / J. Mao, Y. Cheng, M. Chen, F. Pirajno // Mineralium Deposita, 2013. – V. 48. – P. 267–294.
3. Xu L. Seawater contribution to polymetallic Ni–Mo–PGE–Au mineralization in Early Cambrian black shales of South China: Evidence from Mo isotope, PGE, trace element, and REE geochemistry / L. Xu, B. Lehmann, J. Mao // Ore Geology Reviews, 2013. – V. 52. – P. 66–84.
4. Loukola-Ruskeeniemi K. Multiphase evolution in the black-shale-hosted Ni–Cu–Zn–Co deposit at Talvivaara, Finland / K. Loukola-Ruskeeniemi, H. Lahtinen // Ore Geology Reviews, 2013. – V. 52. – P. 85–99.

5. Pi D. H. Trace and rare earth element geochemistry of black shale and kerogen in the early Cambrian Niutitang Formation in Guizhou province, South China: constraints for redox environments and origin of metal enrichments / D. H. Pi, C. Q. Liu, G. A. Shields-Zhou, S. Y. Jiang // Precambrian Research, 2013. – V. 225. – P. 218229.
6. Han T. Metal sources for the polymetallic Ni–Mo–PGE mineralization in the black shales of the Lower Cambrian Niutitang Formation, South China / T. Han, X. Zhu, K. Li, L. Jiang, C. Zhao, Z. // Ore Geology Reviews, 2015. – V. 67. – P. 158–169.
7. Klinkhammer G. P. Uranium in the oceans: where it goes and why / G. P. Klinkhammer, M.R. Palmer // Geochimica Cosmochimica Acta, 1991. – V. 55 (7). – P. 1799–1806.
8. Algeo T. J. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation / T. J. Algeo, N. Tribovillard // Chemical Geology, 2009. – V. 268. – P. 211–225.
9. Mangini A. What do we learn from peaks of uranium and of manganese in deep sea sediments? / A. Mangini, M. Jung, S. Laukenmann // Marine Geology, 2001. – V. 177. – №. 1. – P. 63–78.
10. Лазарева Е. В. распределения элементов между компонентами системы солёного озера методом РФА-СИ / Е. В. Лазарева, А. В. Брянская, О. П. Таран, и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2012. – № 12. – С. 70–80.
11. Bryanskaya A. V. The role of environmental factors for the composition of microbial communities of saline lakes / A. V. Bryanskaya, T. K. Malup, E. V. Lazareva, et al. // BMC Microbiology, 2016. – 16 (1). – 618.
12. Bryanskaya A. V. Metagenomics dataset used to characterize microbiome changes in water and sediments of the lake Solenoe (Novosibirsk region, Russia) / A. V. Bryanskaya, A. A. Shipova, A. S. Rozanov, O. A. Volkova, E. V. Lazareva, Y. E. Uvarova, T. N. Goryachkovskaya, S. E. Peltek // Data in Brief, 2021. – V. 34. – 106709.
13. Бычков А. Ю. Геохимическая модель современного рудообразования в кальдере Узон (Камчатка). / А. Ю. Бычков. – М., ГЕОС, 2009. – 124 с.
14. Anderson R. F. Uranium deposition in Saanich inlet sediments, Vancouver island / R. F. Anderson, A. P. LeHuray, M. Q. Fleisher, J. W. Murray // Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989. – V. 53. – № 9. – P. 2205–2213.
15. Lovley D. R. Enzymatic iron and uranium reduction by sulfate-reducing bacteria / D. R. Lovley, E. E. Roden, E. J. P. Phillips, J. C. Woodward // Marine Geology, 1993. – V. 113. – № 1–2. – P. 41–53.
16. Lovley D. R. Dissimilatory metal reduction / D. R. Lovley // Annual Reviews in Microbiology, 1993. – V. 47. – № 1. – P. 263–290.
17. Liger E. Surface catalysis of uranium (VI) reduction by iron (II) / E. Liger, L. Charlet, P. Van Cappellen // Geochimica Cosmochimica Acta, 1999. – V. 63 (19). – P. 2939–2955.
18. Рихванов Л. П. Радиоактивные элементы в окружающей среде / Л. П. Рихванов, Н. В. Барановская, А. В. Волостнов, Т. А. Архангельская, А. М. Межибор, В. В. Берчук, Л. В. Жорник, Ю. Л. Замятина, А. Ю. Иванов, А. В. Таловская, С. С. Шатилова, Е. Г. Язиков // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов, 2007. – 311 (1). – С. 128–136.

КОМПЛЕКСНОЕ ОСВОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА В ЗАУРАЛЬЕ

Ю. И. Лаптев, А. В. Ладейщиков, А. С. Лавров

Акционерное общество «Далур»
Курганская область, Россия

INTEGRATED DEVELOPMENT OF URANIUM DEPOSITS IN THE TRANS-URALS

Y. I. Laptev, A. V. Ladeyshchikov, A. S. Lavrov

DALUR Joint-Stock Company
Kurgan region, Russia

The possibilities of all-round (integrated) development of uranium deposits in Trans Urals are currently being considered and also working technology of coextracting scandium from solutions of in-situ leaching at Dalmatovo uranium deposit.

Введение

При образовании гидрогенных урановых месторождений Зауралья формировался комплекс попутных компонентов, что было выявлено при проведении разведочных работ [5, 6, 7]. Учитывая содержания попутных компонентов в рудовмещающих породах, их практическую ценность, технологические особенности извлечения урана методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ), наибольший интерес в плане попутной добычи представляют скандий и редкоземельные металлы, присутствующие в технологических растворах при сернокислотном способе извлечения урана. Изучение потребности скандия, а также разработка технологии его эффективного извлечения из растворов подземного выщелачивания (ПВ) урана, позволили, наряду с концентратами урана, организовать промышленное производство соединений скандия.

Геохимические и минералогические особенности урановорудных месторождений Зауралья

На территории Зауралья разведано два месторождения урана (Далматовское, Хохловское), проводится разведка на Добровольном месторождении. Все месторождения однотипные, глубокозалегающие объекты, пригодные для отработки единственно возможным методом СПВ. Рудовмещающая толща месторождений локализована в аллювиальных отложениях палеодолин юрского возраста, врезанных в породы палеозойского фундамента и перекрыта толщей мезо-кайнозойского осадочного чехла. Рудовмещающие породы представлены ритмично чередующимися проницаемыми – гравийно-песчаными отложениями, песками, песчаниками и непроницаемыми – алевропесчаниками, алевролитами, глинами [6]. По содержанию основных петрогенных элементов руды относятся к алюмосиликатным с крайне низким содержанием карбонатов. Урановая минерализация представлена, в основном, настураном (40÷60 %) и коффинитом, развивающимися в межзерновом пространстве песчаных и глинистых пород, как правило, тесно связана с растительной органикой и сульфидной минерализацией. Совместно с ураном в рудах отмечаются повышенные содержания: молибдена (в среднем 0,005÷0,009 %), представленного иордизитом и молибденитом; селена (в среднем 0,01÷0,05 %), представленного самородным селеном и ферросилитом; рения (в среднем 0,5÷0,7 г/т), представленного сульфидами рения, а также повышенными содержаниями рения в органических остатках и сульфидах; меди (в среднем 0,015 %), представленной халькопиритом, борнитом, теноритом; цинка (в среднем 0,013÷0,016 %), представленного сфалеритом.

Из перечисленных компонентов содержания молибдена, селена, рения, меди и цинка превышают кларковые содержания данных элементов, характерные для терригенных пород, однако они не достигают промышленных концентраций. Данные элементы пространственно связаны с геохимическими барьерами, на которых концентрировался уран, но не всегда имеют чёткую корреляционную зависимость с его содержаниями из-за некоторого смещения максимальных концентраций разных элементов в пределах установленной геохимической зональности.

Содержание скандия в водопроницаемых осадках по литологическим типам изменяется от 4,7 г/т до 10,42 г/т, в среднем (для проницаемой части разреза) составляет 5÷6 г/т. Среднее содержание металлов редкоземельной группы для проницаемых разностей пород составляет 95÷108 г/т. Концентрации скандия и редкоземельных элементов в рудах и рудовмещающих породах месторождений близки к кларковым для терригенных пород. Их распределение в литологических разностях пород равномерное, отмечается некоторое их перераспределение в рудообразующей геохимической зональности, но оно не очень значительное. Повышение содержаний скандия и редких земель зафиксировано лишь в бо-

гатых урановых рудах. Отмечается тесная корреляционная зависимость между содержанием скандия и редкоземельных элементов и содержанием глинистой составляющей отложений. Максимальные концентрации этих элементов приурочены к глинам, минимальные – к малоглинистым пескам и песчано-гравийным отложениям. Содержания скандия и редких земель, в основном, связаны с глинистыми минералами, углефицированным детритом, часть металлов редкоземельной группы концентрируются в настуране.

При проведении натурных испытаний методом СПВ при кислотном выщелачивании и последующей промышленной добычи в продуктивных растворах помимо урана зафиксированы лишь повышенные содержания скандия и элементов редкоземельной группы. Остальные попутные компоненты, содержащиеся в рудовмещающей толще, полностью отсутствуют, либо присутствуют в очень незначительных концентрациях. Проводимые опыты по карбонатному выщелачиванию выявили некоторое увеличение в растворах содержаний молибдена при низкой эффективности извлечения урана.

Проведенные в начале 1990-х годов опытно-промышленные работы по комплексному извлечению из урановых руд попутных компонентов показали принципиальную возможность извлечения скандия и редкоземельных металлов (РЗМ) из растворов ПВ (Табл. 1).

Результаты, полученные при проведении лабораторных исследований, и натурных испытаний по извлечению из рудовмещающей толщи скандия, свидетельствуют о том, что динамика перехода скандия в раствор и уровни содержаний на разных этапах выщелачивания практически идентичны. Среднее значение извлечения скандия в раствор составило 15,7 %, что практически полностью совпадает с лабораторными данными [7].

Ресурсный потенциал скандия на месторождениях Зауралья

Скандий в пределах рудных залежей месторождения урана Зауралья широко распространен, но его содержания весьма низкие, на фоновом уровне. В данной ситуации, согласно методическим рекомендациям по комплексному изучению месторождений и подсчёту запасов попутных полезных ископаемых и компонентов [8], скандий относится к III группе по условиям распространения и возможности извлечения, попутное его извлечение должно проходить без особых изменений технологического режима для извлечения урана.

При проведении разведочных работ на всех месторождениях Зауралья проводились исследования по количественному определению содержания скандия для оценки его общих запасов. На Далматовском месторождении был выполнен подсчёт запасов скандия и суммы редкоземельных элементов. Запасы скандия были определены по категории C_2 в контурах балансовых блоков по урану и поставлены на баланс. На Хохловском месторождении в контуре балансовых блоков был выполнен подсчёт запасов скандия. Поскольку на момент утверждения запасов месторождения была неясна практическая возможность и эффективность попутной добычи скандия, решением комиссии ГКЗ запасы скандия были отнесены к прогнозным ресурсам категории P_1 без постановки на баланс. Ресурсы скандия по Добровольному месторождению оценены предварительно по значению запасов ГРМ оперативного подсчёта запасов по результатам проведённых разведочных работ,

Таблица 1. Геотехнологические данные натурных опытных испытаний по извлечению урана, скандия и редкоземельных элементов в продуктивный раствор

Ж : Т, м³/т	Опыт ПВ-89					Опыт ПВ-88	
	Уран		Скандий		$\Sigma_{РЗЭ}$	Скандий	
	Извлечение, %	Среднее содержание в растворе, мг/л	Извлечение, %	Среднее содержание в растворе, мг/л	Среднее содержание в растворе, мг/л	Извлечение, %	Среднее содержание в растворе, мг/л
0,20	6,30	110,9	4,02	1,27	23,3	1,1	0,23
0,40	11,95	114,9	6,14	1,29	27,5	2,3	0,27
0,60	17,64	117,8	9,77	1,56	33,3	3,0	0,26
0,80	21,76	114,6	12,74	1,37	40,8	4,2	0,25
1,00	26,11	110,7	16,09	1,36	41,1	5,1	0,26
1,20	30,44	107,6	19,26	1,35	28,1	6,8	0,29
1,40	34,50	105,7	21,63	1,19	46,4	8,5	0,32
1,58	37,10	103,3	23,24	1,28	35,9	10,6	0,34

через среднее содержание скандия в ГРМ, данная информация требует существенного уточнения. Общий ресурсный потенциал скандия по месторождениям Зауралья представлен в таблице 2.

Создание опытно-промышленного производства скандия

В 2012–14 годах АО «Далур» совместно с ООО «ИнтермиксМет» проведены опытные работы по изучению возможности попутного извлечения скандия и РЗМ из маточных растворов сорбции уранового производства. Было подтверждено промышленное содержание скандия в продуктивных растворах, а также доказана, возможность попутного извлечения скандия из маточных растворов сорбции в значимых, промышленных объемах [16].

В 2017 году на базе имеющихся в АО «Далур» производственных площадей завершено строительство и начата эксплуатация опытно-промышленной установки по попутному извлечению скандия из маточных растворов уранового производства. В период проведения опытно промышленных работ производительность установки по перерабатываемым растворам составляла от 200 до 250 $м^3$/час. В перспективе, за счет ввода дополнительных сорбционных установок, планируется её увеличение до 660 $м^3$/час.

В основу проекта заложены технологические решения, разработанные и опробованные в ходе стендовых испытаний в 2015–2016 годах специалистами УрФУ [2, 10–14]. Все технические решения и мероприятия, реализуемые для добычи урана в части горно-капитальных и горно-подготовительных работ, остаются неизменными и при попутной добыче скандия.

В настоящее время в гидрометаллургии наметилась устойчивая тенденция замены технологий жидкостной экстракции более прогрессивными экстракционно-хроматографическими технологиями, для реализации которых необходимо располагать экстракционно-хроматографическими материалами (сорбентами) [4]. Среди многообразия сорбентов наибольший интерес, прежде всего благодаря своей доступности, представляют комплексообразующие сорбенты, в которых в качестве неподвижной фазы используются эффективные комплексообразующие органические соединения, введённые в состав сорбента в процессе полимеризации – ТВЭКС (твердый экстрагент) [1].

Согласно предложенным технологическим решениям, попутное извлечение скандия из маточных растворов осуществляется с помощью сорбционных процессов на ТВЭКС [9, 3].

На первом этапе, после операций сорбции-десорбции и осаждения, получается первичный продукт – черновой скандиевый концентрат, содержащий до 5 % скандия. Дальнейшая последовательность технологических операций, включающая очистку от примесей, основанную на различной растворимости комплексных фторидных солей скандия и породообразующих элементов, тория, радия, позволяет получать фторид скандия с содержанием (ScF_3 98–99 %) пригодный для прямого изготовления высококачественной лигатуры AlSc2, рисунок 1.

Разработанная технология отличается многовариантностью получения высококачественных конечных продуктов. Так специалистами УрФУ была разработана технология переработки фторида скандия с получением оксида скандия чистотой 99,9 % по основному веществу [15]. По разработанной УрФУ проектной документации на АО «Далур» был построен

Таблица 2. Ресурсный потенциал скандия на месторождениях Зауралья по состоянию на 01.01.2021

Объекты потенциальной добычи скандия	Категория запасов, ресурсов	Количество подсчитанных запасов, ресурсов, т	Среднее содержание скандия в горно-рудной массе, г/т	Количество поставленных на Госбаланс запасов, т
Далматовское месторождение				
Центральный участок	C_2	146,3	6,6	146,3
Уксянский участок	C_2	82,0	5,8	82,0
Всего:	**C_2**	**228,3**	**6,3**	**228,3**
Хохловское месторождение	**P_1**	**116,3**	**4,8**	**–**
Добровольное месторождение*	**P_1**	**151,0**	**5,1**	**–**
Итого:	**$C_2 + P_1$**	**495,6**	**5,6**	**228,3**

* Предварительный подсчёт, выполненный на основании оперативного подсчёта запасов урана по результатам разведочных работ 2019–2020 гг.

участок получения оксида скандия из фторида скандия, который позволяет переработать весь получаемый фторид в оксид, при этом используется всего 4–5 экстракционных аппаратов.

На сегодняшний день АО «Далур» поставляет оксид скандия высокой чистоты (> 99,9 %) в адрес АО «ТД Галион» по долгосрочному контракту. Кроме того, ведутся переговоры с потенциальными потребителями, а также работы направленные на расширение продуктовой линейки, за счет фторида скандия и алюминиево-скандиевой лигатуры, производство которых организовано в АО «Далур».

Существующие на данный момент в АО «Далур» производственные мощности позволяют выпускать до 1200 килограмм скандия в год, в составе реализуемых продуктов производства. В ближайшей перспективе планируется расширение производственных мощностей.

Редкоземельные элементы

В 2020 году ФГАОУ Уральский Федеральный Университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» совместно с АО «Далур» были проведены исследования направленные на разработку технологии производства РЗМ-актиниевого концентрата из продуктивных растворов подземного выщелачивания урана АО «Далур». На сегодняшний день УРФУ предложена технология поучения суммарного концентрата РЗЭ и растворов ПВ урана, с последующим выделением индивидуальных оксидов среднетяжелой группы РЗЭ, а также актиния-227.

Конечной продукцией, производство которой возможно на площадке АО «Далур» на основе разрабатываемой технологии, являются оксиды РЗЭ (La, Ce, Pr, Nd, С–Т). Данные продукты выбраны в качестве основных продуктов проекта, поскольку в настоящее время для них имеется сформированный рынок, а также известны достоверные данные, позволяющие произвести обоснованные экономические оценки. Производство и продажи оксидов РЗЭ на основе разрабатываемой технологии позволят обеспечить рентабельность производства и окупаемость инвестиций. Кроме того, в настоящее время на мировом рынке активно растут продажи радиофармпрепарата диоксида радия (темп роста ориентировочно примерно 20 % в год). Производители данного препарата могут рассматриваться как потребители второго продукта проекта – Актиния 227.

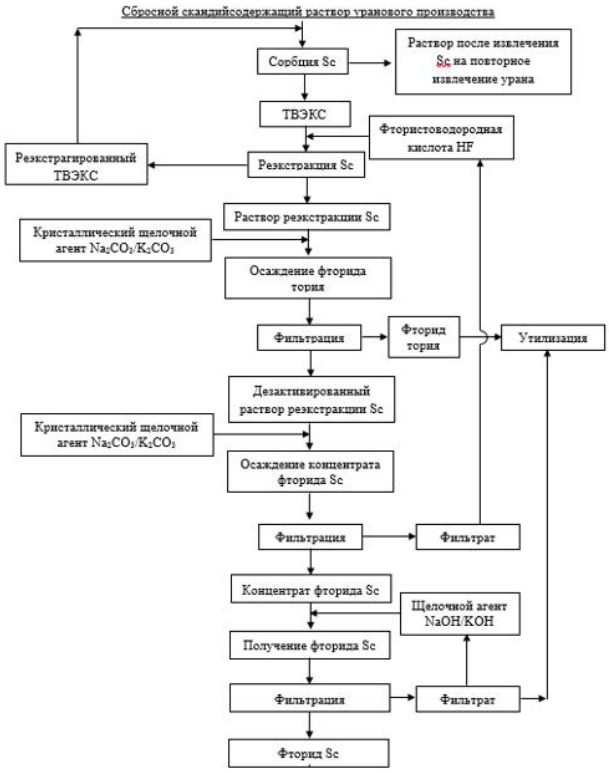


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема получения фторида скандия (концентрата фторида скандия)

Заключение

В 2017 году на базе имеющихся в АО «Далур» и высвобожденных производственных площадей завершено строительство и запущена в эксплуатацию опытно-промышленная установка по попутному извлечению скандия из маточных растворов уранового производства с проектной производительностью по растворам до 200 м^3/час. К настоящему времени, отработаны различные технологические режимы процесса переработки скандийсодержащих растворов, получено более 800 кг оксида скандия высокой чистоты, а также выполнены работы по получению лигатуры AlSc2, соответствующей ГОСТ Р 53777-2010.

Литература

1. Kabay N. Solvent-impregnated resins (SIRs) – Methods of preparation and their applications / N. Kabay, J. L. Cortina, A. Trochimczuk, M. Streat // Reactive and Functional Polymers, 2010. – № 70. – С. 484–496.
2. Smirnov A. L., Study of scandium and thorium sorption from uranium leach liquors/ A. L. Smirnov, S. M. Titova, V. N. Rychkov, G. M. Bunkov, E. V. Kirillov, I. A. Svirsky, V. S. Semenishchev, N. N. Poponin // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2017. – Т. 312. – № 2. – С. 277–283.
3. Кондруцкий Д. А., Кириллов Е. В., Рычков В. Н., Кириллов С. В., Буньков Г. М., Востров Е. С., Третьяков В. А., Гаджиев Г. Р., Попонин Н. А., Смышляев Д. В. Твердый экстрагент с высокой динамической обменной емкостью для извлечения

скандия и способ его получения. Патент на изобретение RU 2650410 C1, 13.04.2018. Заявка № 2017124151 от 07.07.2017.
4. Коровин В. Ю. Синтез, свойства и применение твёрдых экстрагентов (Обзор) / В. Ю. Коровин, С. Б. Рандаревич // Химическая технология, 1991. – № 5. – С. 3–13.
5. Ладейщиков А. В. и др. Отчёт о результатах разведочных работ, выполненных на Хохловском месторождении урана, с подсчётом запасов по состоянию на 01.01.2017. Иркутск, 2017.
6. Лучинин И. Л. и др. Отчёт Тургайской партии № 89 о результатах предварительной разведки Добровольного рений-редкоземельно-уранового месторождения в Северном Тургае. Екатеринбург, 1994.
7. Марков С. Н. и др. Отчёт о детальной разведке Далматовского месторождения с подсчётом запасов по состоянию на 01.01.1994. Екатеринбург, 1995.
8. Методические рекомендации по комплексному изучению месторождений и подсчёту запасов попутных полезных ископаемых и компонентов. – М.: ФГУ ГКЗ, 2007.
9. Рычков В. Н., Кириллов Е. В., Кириллов С. В., Буньков Г. М., Боталов М. С., Попонин Н. А., Смирнов А. Л., Машковцев М. А., Смышляев Д. В. Способ переработки сбросных скандийсодержащих растворов уранового производства. Патент на изобретение RU 2622201 C , 13.06.2017. Заявка № 2016111528 от 28.03.2016.
10. Рычков В. Н., Кириллов Е. В., Кириллов С. В., Буньков Г. М., Боталов М. С., Попонин Н. А., Смирнов А. Л., Смышляев Д. В. Способ получения концентрата скандия из скандийсодержащего раствора. Патент на изобретение RU 2613238 C, 15.03.2017. Заявка № 2015130383 от 22.07.2015.
11. Рычков В. Н., Кириллов Е. В., Кириллов С. В., Буньков Г. М., Боталов М. С., Попонин Н. А., Смирнов А. Л., Смышляев Д. В. Способ извлечения скандия из скандийсодержащего продуктивного раствора. Патент на изобретение RU 2612107 C, 02.03.2017. Заявка № 2015130381 от 22.07.2015.
12. Рычков В. Н., Кириллов Е. В., Кириллов С. В., Буньков Г. М., Боталов М. С., Попонин Н. А., Смирнов А. Л., Смышляев Д. В., Титова С. М., Свирский И. А. Способ получения концентрата скандия из скандийсодержащего раствора. Патент на изобретение RU 2674717 C2, 12.12.2018. Заявка № 2016146632 от 28.11.2016.
13. Рычков В. Н., Кириллов Е. В., Кириллов С. В., Буньков Г. М., Боталов М. С., Попонин Н. А., Смирнов А. Л., Смышляев Д. В., Титова С. М., Свирский И. А. Способ получения концентрата скандия из скандийсодержащего раствора. Патент на изобретение RU 2684663 C1, 11.04.2019. Заявка № 2018117011 от 07.05.2018.
14. Рычков В. Н., Кириллов Е. В., Кириллов С. В., Буньков Г. М., Боталов М. С., Смирнов А. Л., Смышляев Д. В. Способ получения концентрата скандия. Патент на изобретение 2731951 C2, 09.09.2020. Заявка № 2018141853 от 28.11.2018.
15. Рычков В. Н., Кириллов Е. В., Кириллов С. В., Буньков Г. М., Боталов М. С., Попонин Н. А., Смирнов А. Л., Смышляев Д. В. Способ получения оксида скандия из концентрата скандия. Патент на изобретение RU 2647047 C1, 13.03.2018. Заявка № 2017115397 от 02.05.2017.
16. Смышляев В. Ю. О попутной добыче скандия из маточных растворов подземного выщелачивания на Далматовском месторождении урана // Горный журнал, 2017. – №8. – С. 28–32.

РАДИОГЕОХИМИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ ИНТРУЗИВОВ ПО АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Р. А. Леденгский

Норильский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ»
Норильск, Россия, ledengskiyra@yandex.ru

RADIOGEOCHEMICAL MAPPING OF INTRUSIVES ON AIRBORNE GEOPHYSICAL DATA

R. A. Ledengskiy

Norilsk branch of the FSBI «VSEGEI»
Norilsk, Russia, ledengskiyra@yandex.ru

The article presents methods of processing and interpretation of materials of an integrated airborne geophysical survey (magnetometry, gamma-spectrometry) at a scale of 1 : 50 000 for radiogeochemical mapping intrusives on the example of the northern part of the Balygychano-Sugoi trough.

Радиогеохимическое картирование по гамма-спектрометрическим данным представляет собой изучение закономерностей пространственного распределения естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) в горных породах для решения задач геологического картирования и прогноза различных типов рудной минерализации [1].

Закономерности распределения и миграции ЕРЭ в истории геологического развития различных структур земной коры обусловлены комплексом различных геологических процессов. К таковым процессам относятся сингенетические – осадконакопление и магматизм, формирующие первично-конституциональное равномерно-рассеянное распределение ЕРЭ; и эпигенетические – метаморфизм, корообразование, гидротермальная деятельность, инфильтрационные изменения и рудообразование, которые приводят к нарушению первичного распределения ЕРЭ и формированию их наложенных концентраций.

Кроме того, естественные радиоактивные элементы обладают высокой миграционной способностью в различных ландшафтно-геохимические обстановках. В связи с этим при выветривании горных пород происходит достаточно интенсивное гипергенное перераспределение элементов и продуктов их распада, сильно осложняющее изучение их первичного распределения и являющееся мешающим фактором, который необходимо учитывать [2].

В итоге, результаты проявления сингенетических и эпигенетических изменений с учетом геологических и ландшафтных условий отражаются на характере распределения радиогеохимического поля верхней части земной коры с областями привноса и выноса ЕРЭ, которые также могут служить поисковыми признаками оруденения различных типов [3, 4].

Первичными материалами для радиогеохимических построений являются карты содержаний урана (радия), тория, калия и карта мощности дозы суммарного гамма-излучения, представительные для слоя земной поверхности мощностью от 10 до 50 см.

При радигеохимическом картировании одной из необходимых задач для решения является вопрос определения фона. На радиогеохимических картах обычно отражаются равномерно рассеянный радиогеохимический фон, свойственный неизмененным горным породам; радиогеохимически специализированные комплексы (первый уровень концентрации) и эпигенетические (локальные) концентрации элементов (второй уровень концентрации) [4]. По выборкам для каждого геологического комплекса (фациальной, формационной разновидности) рассчитываются средние содержания элементов (q) и стандартные отклонения (S). В случае удовлетворения закону нормального распределения, определяются уровни, повышенные и пониженные относительно средних содержаний на 1,3S и 3S [3].

Так как, каждое геологическое образование обладает индивидуальным устойчивым соотношением ЕРЭ, изменяющимся в процессе эпигенетических эндогенных и гипергенных преобразований, то для определения фоновых содержаний требуется геологическая основа, учитывающая ландшафтно-геоморфологическую ситуацию.

Определение характера эпигенетических изменений возможно осуществить расчетами отношений вида Th/U, Th/K, U/K, (U • K)/Th. Относительно устойчивые для большинства типов неизмененных геологических образований, они принимают экстремальные значения в пределах тех комплексов горных пород для которых характерно нарушение типовых отношений числителя и знаменателя. Недостатками отношений являются высокая чувствительность к изменению ландшафтной обстановки и высокий уровень флюктуаций, особенно при низких значениях гамма-поля. Более устойчивы к геологическим поме-

хам корреляционные методы преобразования, основанные на использовании аппарата компонентного или регрессионного анализов.

На данный момент представлены несколько методик составления радиогеохимических карт, основанные на анализе геолого-ландшафтного строения территории или исследовании структуры взаимосвязей ЕРЭ с помощью факторного, регрессионного или компонентного анализов методом главных компонент [3–6]. В основу положено то, что под влиянием различных эпигенетических процессов, в том числе и рудных, протекавших с перераспределением радиоактивных элементов, нарушается их первоначальная концентрация и, как следствие, структура их взаимосвязей, свойственная неизмененным горным породам. Каждый метод обладает своими преимуществами, но общими проблемами для всех являются вопрос определения фона и необходимость привлекать дополнительную априорную информацию о геологических и ландшафтных условиях, которая может быть не всегда доступна или достоверна.

В данной работе для целей радиогеохимического картирования предложено и выполнено вычисление надфоновых содержаний ЕРЭ на основе оценки вклада каждого элемента в общую гамма-активность горных пород. Для каждого естественного радиоактивного элемента, используя соответствующий гамма-эквивалент, определялось его надфоновое содержание. Значение гамма-эквивалента соответствует мощности дозы от единицы содержания радионуклида на высоте 1 м от излучающей поверхности и зависит от условия насыщенного полупространства [7].

Полученные величины, центрированные и нормированные, объективно отображают радиогеохимическую специализацию геологических образований, независимо от наличия априорной информации о геологических и ландшафтных условиях. Сопоставление надфоновых содержаний ЕРЭ реализуется путем качественной классификации территории по уровню избытка или дефицита одного из трех элементов и позволяет определить радиогеохимическую специализацию горных пород [8].

В качестве объекта для радиогеохимического картирования использовались материалы комплексной аэрогеофизической съемки масштаба 1 : 50 000 северной части Балыгычано-Сугойского прогиба (Балыгычанская площадь, Магаданская область).

Балыгычано-Сугойский орогенный прогиб представлен нижнемеловыми вулканогенно-осадочными отложениями и заложен по Омсукчанскому глубинному разлому фундамента складчатой системы. На юге прогиб тесно смыкается с Охотско-Чукотским вулканогенным поясом и рассматривается в качестве его ответвления. В пределах прогиба размещаются золотосеребряное, оловянное и медно-молибденовое оруденения.

Геологическое строение северной части Балыгычано-Сугойского прогиба в пределах Балыгычанской площади представлено стратифицированными осадочными и магматическими образованиями от перми до современной эпохи. Пермские, триасовые и юрские отложения составляют верхоянский терригенный комплекс, меловые образования представлены интрузивными породами, вулканогенными и вулканогенно-осадочными отложениями. Интрузивные образования площади представлены ранне-позднемеловым быстринским плутоническим диорит-гранодиоритовым, позднемеловыми омсукчанским плутоническим лейкогранитовым и наяханским габбро-лейкогранитовым комплексами (рис. 1 А) [9–12].

Омсукчанский комплекс распространен преимущественно в пределах Балыгычано-Сугойского прогиба и его обрамления, где объединяет массивы Егорлыкский и Марат. В пределах Егорлыкского массива широко распространены кварц-турмалиновые, касситерит-турмалин-кварцевые, хлорит-кварцевые жилы, содержащие оловянное оруденение. Представленные на площади коренные и россыпные малые промышленные месторождения олова обнаруживают тесную пространственную и, вероятно, парагенетическую связь с массивом (Рис. 1 А) [9, 10].

К быстринскому комплексу относятся небольшие массивы Громадинский и Нижненский. В их составе преобладают гранодиориты, диориты, менее распространены граниты. К северо-восточной части Громадинского массива приурочено малое золотосеребряное месторождение Громада, расположенное на соседнем с запада листе (P-56-IV) [11].

На счет массивов Нягаинский, Кобзарь и Светлинский диорит-гранодиоритового состава пока еще ведутся дискуссии по отнесению их либо к быстринскому либо к наяханскому комплексу. В данной работе массивы отнесены к наяханскому комплексу. С гранитоидами наяханского комплекса в 15 километрах южнее Балыгычанской площади (P-56-XII) связаны жилы с золотосеребряной минерализацией месторождения Арылах [12].

В пределах Балыгычанской площади в экзоконтактах и среди роговиков массивов быстринского и наяханского комплексов широко распространены кварцевые, сульфидно-кварцевые жилы и прожилки, содержащие повышенные концентрации золота, серебра, свинца, цинка, сурьмы, олова, мышьяка, вольфрама [9, 10].

В целом, Балыгычанская площадь, согласно минерагеническому районированию ГГК-1000/3, включена в Балыгычано-Сугойскую (Ag, Au, Sn) и Сеймчанскую (Sn, Au, Ag, Co) минерагенические зоны и характеризуется наличием месторождений олова, рудопроявлений золота и серебра, которые приурочены к экзоконтактовым и апикальным частям интрузивных массивов различных комплексов. Поэтому можно предположить, что интрузивы в зависимости от принадлежности к тому или иному комплексу мо-

гут быть рудовмещающими для соответствующего типа рудной минерализации, например, быстринский и наяханский – к золотосеребряной, а омсукчанский – к оловянной [13].

Аэрогеофизическая съемка выполнена Норильским филиалом ФГБУ «ВСЕГЕИ» на вертолете Eurocopter AS350 с применением комплекса, включающего аэромагнитометр с квантовым цезиевым датчиком и частотой регистрации 100 Гц; аэрогамма-спектрометр объемом детектора 32 л; систему спутниковой навигации. Аэросъемка проведена с детальным огибанием рельефа при средней скорости 170 км/час и средней высоте полета 50 м. Обработка геофизического материала выполнена с применением программы Oasis montaj (Geosoft).

Комплексная интерпретация полученных геофизических полей позволила достаточно уверенно картировать магматические породы и зоны контактово-метасоматических изменений (рис. 1 Б–Г). Так, например, обе ветви северной части Омсукчанского разлома трассируются полосой метасоматически измененных пород шириной от 2 до 10 км, которые выделяются повышенными значениями мощности дозы суммарного гамма-излучения до 28 мкР/ч (рис. 1 В).

Площадными отрицательными аномалиями поля силы тяжести отчётливо выделяются массивы Егорлыкский, Марат (омсукчанский комплекс) и массивы Громадинский, Нижненский (быстринский комплекс) (рис. 1 Б).

В гамма-спектрометрических полях наиболее контрастно выделяются массивы Егорлыкский и Марат, высокими значениями до 42 мкР/ч (рис. 1 В). В магнитном поле плутонам Егорлыкский и Марат свойственны площадные слабоинтенсивные отрицательные аномалии в обрамлении высокоинтенсивных магнитных аномалий экзоконтактовых изменений (рис. 1 Г).

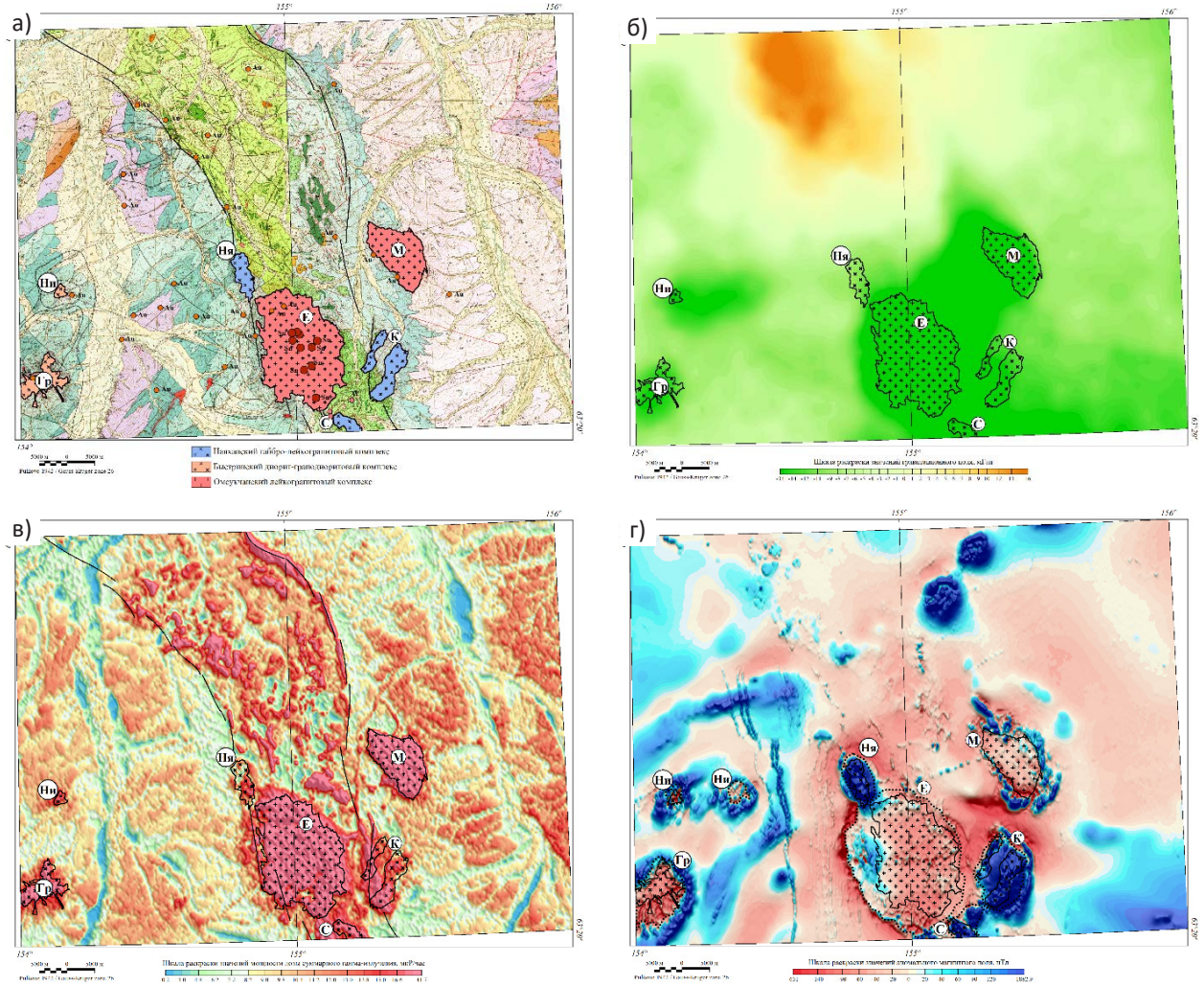


Рис. 1. Геолого-геофизическая характеристика северной части Балыгычано-Сугойского прогиба

А – ГГК-200/1 P56-V,VI; Б – карта поля силы тяжести; В – карта мощности дозы суммарного гамма-излучения; Г – карта аномального магнитного поля. Обозначения интрузивных образований: Ни – Нижненский, Ня – Нягаинский, М – Марат, Гр – Громадинский, Е – Егорлыкский, К – Кобзарь, С – Светлинский. Пунктиром выделены уточненные границы интрузивных массивов.

Громадинский и Нижненский массивы маркируются повышенным уровнем радиоактивности до 26 мкР/ч, и характеризуются областями слабоинтенсивного отрицательного магнитного поля, в обрамлении высокоинтенсивных положительных аномалий до 500 нТл, совпадающих с зоной ороговикования. Эти зоны отстоят от границ массивов на 500–1000 м, шириной до 3 км (рис. 1 В, Г).

Сопряженная с небольшим выходом гранодиорит-порфиров Нижненского штока локальная отрицательная аномалия силы тяжести вытянута в широтном направлении и простирается к востоку за пределы массива (рис. 1 Б). В восточной части контура данной гравиметрической аномалии и в магнитном поле выделяется аналогичная структура, которая интерпретируется как апофиз общего интрузивного тела. Восточный шток перекрыт терригенными мезозойскими отложениями и четвертичными образованиями р. Балыгычан, мощность которых оценивается в первые десятки метров [9]. Размеры Громадинского и Нижненского массивов, картируемые под перекрывающими отложениями только по геофизическим данным, расширены в 2,5 раза, с 36 до 93 км^2 (рис. 1 Г).

По ярко выраженным площадным высокоинтенсивным положительным аномалиям магнитного поля до 1400 нТл и средним значениям радиоактивности до 20 мкР/ч выделяются интрузивные массивы Нягаинский, Кобзарь и Светлинский (наяханский комплекс) (рис. 1 В, Г). Массивы обрамляются контрастными субкольцевыми положительными магнитными аномалиями контактовых роговиков, которые могут иметь рудоконтролирующую роль для золотосеребряного оруденения [14, 15].

Таким образом, материалы магнитного и гамма-спектрометрического методов позволили уточнить контуры известных интрузивных массивов, площадь их невскрытой части увеличена почти на 70 % от выхода на дневную поверхность по данным геологической карты первого поколения (рис. 1 Г).

Для дальнейшего изучения и разделения гранитоидных образований проведен статистический анализ радиогеохимических полей гранитоидных интрузий. При анализе использовано положение о сохранении торий-уранового отношения в пределах интрузивов одного комплекса, независимо от петрографических разновидностей слагающих его пород. Отношение тория к урану является хорошим показателем условий образования породы. Основная масса урана и тория накапливается к концу магматического процесса в остаточном расплаве, что значительно увеличивает радиоактивность пород от ранних дифференциатов к поздним. Независимо от содержаний тория и урана, в системе гранодиорит – лейкогранит, величина их отношения постоянна и укладывается в пределах единой линейной зависимости [16–18].

Значения радиоактивных элементов были взяты по медианам содержаний урана и тория на участках выборки в пределах границ всех интрузивных массивов (рис. 2). Участки выборки представляют собой квадраты площадью 4 км^2, что соответствует 420 точкам. По каждому интрузивному массиву выбирался участок или несколько участков в областях спокойного неизрезанного гамма-поля и равномерного распределения содержаний урана и тория.

Таблица 1. Торий-урановое отношение интрузивных массивов Балыгычанской площади

Интрузив	№ участка выборки	Th/U	Медиана содержаний	
			U, г/т	Th, г/т
Нижненский	Ни	*2,99*	3,41	10,18
Марат	М.1	*3,17*	5,54	17,54
	М.2	*3,05*	6,34	19,33
	М.3	*3,10*	5,98	18,54
Светлинский	С	*3,25*	4,17	13,55
Егорлыкский	Е.1	*3,24*	6,03	19,57
	Е.2	*3,20*	6,95	22,23
	Е.3	*3,49*	4,95	17,26
	Е.4	*3,41*	5,47	18,66
Нягаинский	Ня	*3,39*	2,99	10,14
Кобзарь	К.1	*3,21*	3,89	12,48
	К.2	*3,63*	3,98	14,47
Громадинский	Г	*3,97*	3,95	15,65

Наименьшие значения торий-уранового отношения (2,9) относятся к частично вскрытому гранодиоритовому массиву Нижненский. Средние значения (около 3,3) характерны для гранодиоритовых массивов Нягаинский, Кобзарь, Светлинский и для гранитных массивов Егорлыкский и Марат. Максимальное значение с ториевой доминантой (3,9) у Громадинского массива преимущественно гранодиоритового состава с центральной гранитной частью (табл. 1).

На рисунке 3 представлена диаграмма распределения интрузивов по торий-урановому отношению, демонстрирующая их разделение на две группы, вероятно в зависимости от состава и основности пород. Первая группа имеет неупорядоченное распределение низких содержаний торий и урана, и характеризуется средним гранодиоритовым составом. К этой группе относятся массивы Нягаинский, Нижненский, Кобзарь, Громадинский и Светлинский двух комплексов (быстринский и наяханский). Вторая группа имеет устойчивую линейную связь тория и урана и повышенные значения их содержаний. Группа отражает только два интрузива Егорлыкский и Марат кислого гранитного состава, что подтверждает их принадлежность к одному омсукчанскому комплексу.

Равномерное увеличение содержаний элементов (накопление урана и тория) интрузивов Егорлыкский и Марат может сообщать о неоднородности

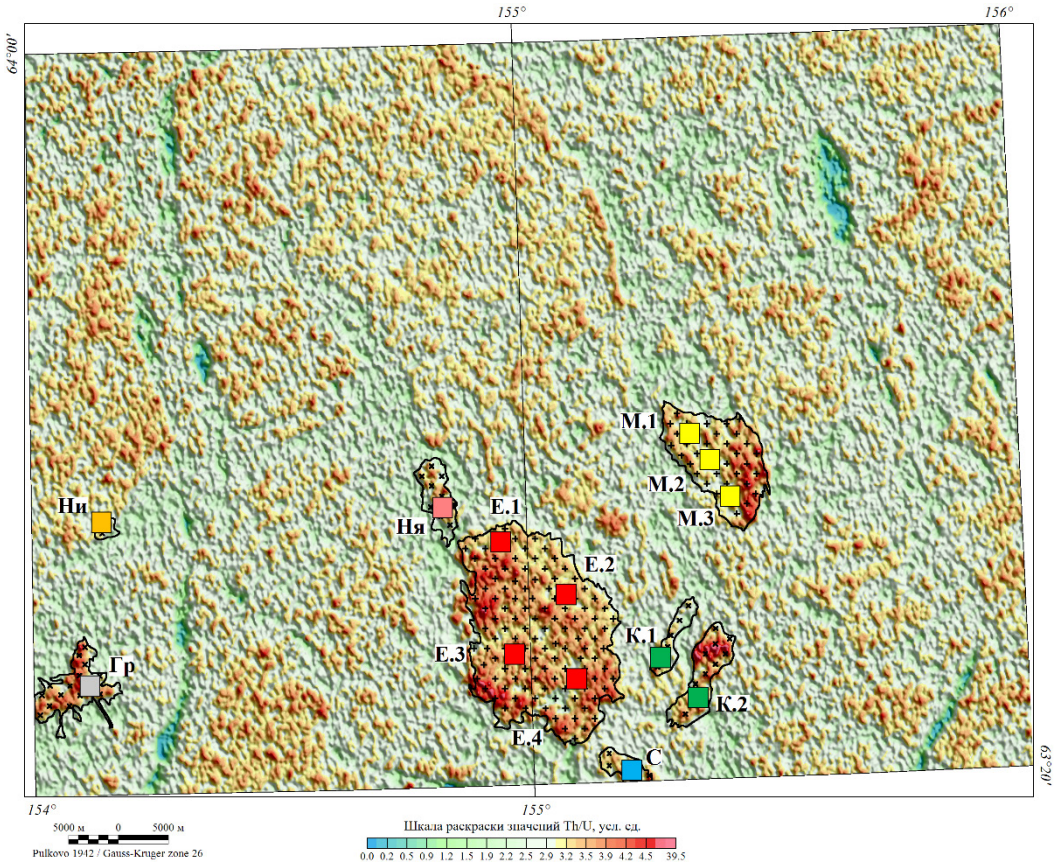


Рис. 2. Карта торий-уранового отношения северной части Балыгычано-Сугойского прогиба с расположением участков для статистического анализа

Условные обозначения согласно Рис. 1.; М.1 – номера участков выборки

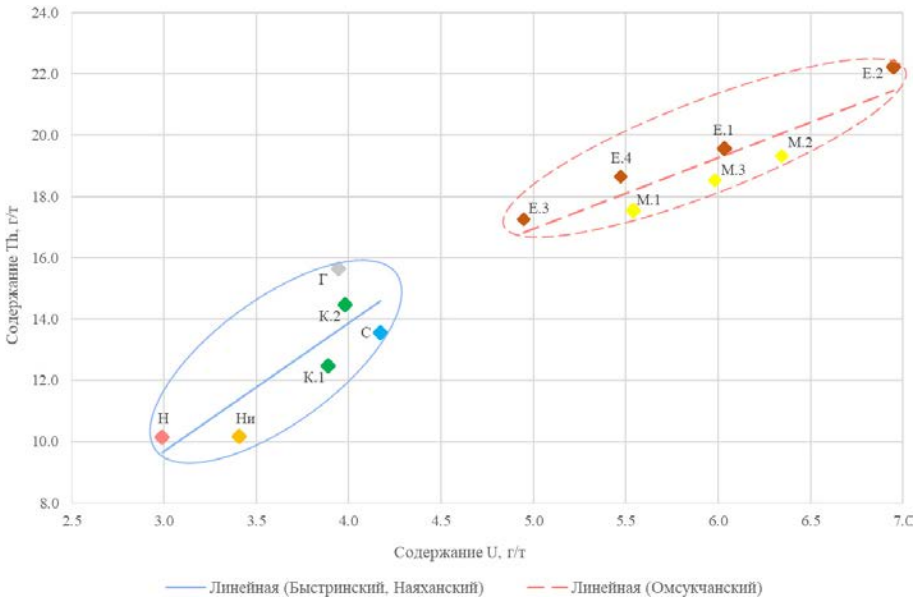


Рис. 3. Торий-урановое отношение интрузивов Балыгычанской площади

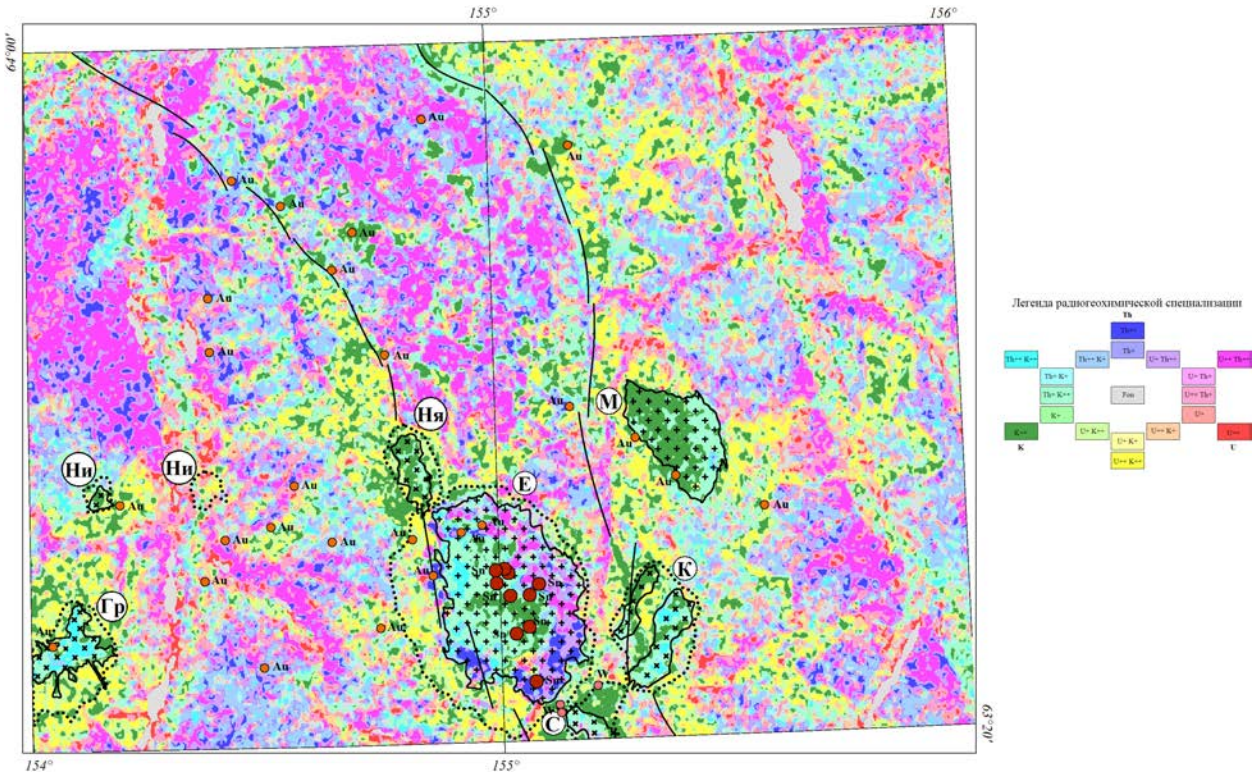


Рис. 4. Сводная радиогеохимическая карта северной части Балыгычано-Сугойского прогиба

Условные обозначения согласно Рис. 1.

строения массивов, то есть как о нескольких фазах внедрения магматического расплава (собственно интрузивной и жильной), так и нескольких фациях собственно интрузивной фазы (главной интрузивной и эндоконтактовой) [19]. Участок Е.3 располагается в центральной части интрузива Егорлыкский, а участки Е.4, Е.1 и Е.2 с более повышенными содержаниями тория и урана находятся в периферических частях массива, представляющих собой краевую мелкозернистую фацию гранитов-аляскитов с дайками аплитов. Согласно ГГК-200 в центральной части массива Марат (участок М.2 с более повышенными содержаниями тория и урана) отмечены пересечения среднезернистых гранитов мелкозернистыми. Различными авторами эти мелкозернистые граниты считаются либо продуктами второй фазы внедрения магмы, либо – эндоконтактовой фацией аплитовых гранитов [10].

В целях радиогеохимического картирования и уточнения радиогеохимической специализации интрузивов выполнено вычисление надфоновых содержаний естественных радиоактивных элементов по представленной выше методике. Полученная карта достаточно отчетливо отражает распределение основных вещественных комплексов на площади и их структурные взаимоотношения (Рис. 4).

Метасоматически измененные породы в зоне Омсукчанского разлома на сводной радиогеохимической карте выделяется существенно калиевой и уран-калиевой специализацией пород, контролирующей золото-серебряное и оловянное оруденение.

Практически все интрузивы, расположенные на Балыгычанской площади: Громадинский, Нижненский, Марат, Нягаинский, Кобзарь и Светлинский характеризуются преимущественно торий-калиевой, калиевой и в меньшей степени уран-калиевой радиогеохимическими специализациями пород, связанными вероятно с мощными зонами калиевого метасоматоза.

Центральная часть Егорлыкского интрузива также имеет преимущественно калиевую и торий-калиевую доминанты, свойственные центральным частям тел кислых лейкократовых гранитов. Краевые же части массива обладают ториевой и уран-ториевой специализациями пород, связанными с предпочтительным обогащением ураном и торием эндоконтактовых частей интрузий кислого состава от ранних к поздним фазам внедрения [20, 21]. При дальнейшем постмагматическом кислотном метасоматозе содержание урана увеличивается в грейзенизированных гранитах и грейзенах, а торий выносится, обогащая зоны поздней альбитизации и калишпатизации [19]. Для месторождений и проявлений олова характерны участки торий-калиевой и ториевой радиогеохимической специализации пород.

Надинтрузивные зоны невскрытых частей интрузивов (контактовые роговики) имеют калиевую и уран-калиевую радиогеохимические специализа-

Таблица 2. Интрузивные комплексы Балыгычанской площади

Комплекс	Массивы	Качественные геофизические характеристики	Рудная специализация
Наяханский	Светлинский, Кобзарь, Нягаинский	– средняя радиоактивность; калиевая радиогеохимическая специализация горных пород; – площадные высокоинтенсивные положительные магнитные аномалии; – положительные аномалии локальной составляющей поля силы тяжести	Золото-серебряная
Быстринский	Громадинский, Нижненский	– повышенная радиоактивность; торий-калиевая радиогеохимическая специализация горных пород; – площадные слабоинтенсивные отрицательные магнитные аномалии; – высокоинтенсивные положительные магнитные аномалии контактового ореола; – площадные отрицательные аномалии поля силы тяжести	
Омсукчанский	Егорлыкский, Марат	– высокая радиоактивность; калиевая, торий-калиевая радиогеохимическая специализация горных пород; – площадные слабоинтенсивные отрицательные магнитные аномалии; – высокоинтенсивные отрицательные магнитные аномалии контактового ореола (Егорлыкский), высокоинтенсивные положительные магнитные аномалии контактового ореола (Марат); – площадные отрицательные аномалии поля силы тяжести	Оловянная

ции пород, которые характерны для зон калиевого метасоматоза и могут указывать на определенные перспективы рудоносности [15, 17]. Также, в областях калиевой и уран-калиевой доминанты установлены практически все проявления золота, представленные на Балыгычанской площади.

Таким образом, методический прием расчета надфоновых содержаний ЕРЭ позволил установить для интрузивных массивов северной части Балыгычано-Сугойского прогиба калиевую, калий-ториевую, уран-калиевую, и в меньшей степени, ториевую радиогеохимическую специализацию пород.

В итоге, в данной работе выполнено картирование массивов Балыгычанской площади по геофизическим материалам, подтверждающее их классификацию по комплексам. Поскольку каждый комплекс ассоциируется с соответствующим типом оруденения, то с массивами наяханского и быстринского комплексов связана золотосеребряная минерализация, с массивами омсукчанского комплекса – оловянная (табл. 2). Следовательно, представленная методика радиогеохимического картирования и полученные результаты будут способствовать дальнейшему изучению геологического строения площади и последующему прогнозу благороднометалльного и оловянного оруденения, с выделением перспективных участков в пределах северного фрагмента Балыгычано-Сугойского прогиба.

Заключение

Предложенная методика радиогеохимического картирования и интерпретации современных геофизических материалов Балыгычанской площади позволили:

- картировать интрузивные массивы, с уточнением контуров распространения;
- изучить внутреннее строение массивов Егорлыкский и Марат с разделением на фациальные разности;
- разделить интрузивные образования по геофизическим данным на геологические комплексы, каждый из которых является перспективным на определённый тип оруденения.

Литература

1. Аэрорадиогеохимическое картирование. Методические рекомендации / под ред. А. И. Краснов, Е. Б. Высокоостровская, Е. И. Зубов. – Л.: НПО Рудгеофизика, 1983. – 104 с.
2. Радиогеохимические исследования. Методические рекомендации / под ред. Савинова И. Б., Смыслов А. А., Титов В. К. – М.: Мингео СССР, 1974. – 144 с.
3. Высокоостровская Е. Б., Краснов А. К. Основные принципы и методика составления радиогеохимических карт по аэрогамма-спектрометрическим данным // Методы рудной геофизики. – Л., 1976. – Вып. 11. – С. 61–69.
4. Смыслов А. А., Плющев Е. В. Основные принципы и методы составления радиогеохимических карт. // Тр. ВСЕГЕИ – Нов.серия. – Л., 1968. – Т. 164. – С. 104–134.
5. Зубов Е. И. Автоматизированное выделение радиогеохимически специализированных комплексов горных пород и зон нарушенного распределения радиоактивных элементов средствами системы АСОМ-АГС/ЕС // Методы рудной геофизики. Рудная аэрогеофизика. – Л.: НПО «Рудгеофизика», 1989. – С. 137–146.
6. Соболев И. С. Орехов А. Н. Использование элементов многомерной статистики для обработки данных наземной гамма-спектрометрии при поисках гидротермальных месторождений золота // Известия Томского политехнического университета. Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), 2018. – Т. 329. – № 7. – С. 104–115.
7. Airborne gamma ray spectrometer surveying. Technical Reports Series № 323. – IAEA, Vienna, Austria, 1991. – P. 116.
8. Лазарев Ф. Д., Ромашко В. В., Кирплюк П. В. Естественные радиоактивные элементы-эффективный инструмент прогноза золоторудных объектов // Материалы IV Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 321–323.
9. Государственная геологическая карта СССР первого поколения. Масштаб 1 : 200 000. Серия Верхнеколымская. Лист P-56-V / Кузнецов В. М. – М.: Мингео СССР, 1982.
10. Геологическая карта СССР первого поколения. Масштаб 1 : 200 000. Серия Верхнеколымская. Лист P-56-VI / Львов К. Л. – М.: Мингео СССР, 1985.
11. Государственная геологическая карта СССР первого поколения. Масштаб 1 : 200 000. Серия Среднеколымская. Лист P-56-IV / Гусаров Б. М. – М.: Мингео СССР, 1983.
12. Государственная геологическая карта РФ второго поколения. Масштаб 1 : 200 000. Серия Сугойская. Лист P-56-XII / Ливач А. Э. – СПб.: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2000.
13. Государственная геологическая карта РФ третьего поколения. Масштаб 1 : 1 000 000. Серия Верхояно-Колымская. Лист P-56, Сеймчан / Кузнецов В. М., Жигалов С. В. – СПб.: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2007.
14. Логачев А. А., Захаров В. П. Магниторазведка. 5-е изд. – Л.: Недра, 1979. – 351 с.
15. Стружков С. Ф, Константинов М. М. Металлогения золота и серебра Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. – М.: Научный мир, 2005. – 320 с.
16. Смыслов А. А. Уран и торий в земной коре. – Л.: Недра, 1974. – 231 с.
17. Сыромятников Н. Г. Радиоактивные элементы как геохимические индикаторы породо- и рудообразования. – М: Атомиздат, 1976. – 232 с.
18. Арбузов С. И., Рихванов Л. П. Геохимия радиоактивных элементов. – Томск: Издательство ТПУ, 2010. – 300 с.
19. Емельяненко П. Ф., Яковлева Е. Б. Петрография магматических и метаморфических пород. – М., 1985. – 247 с.
20. Средне-мелкомасштабная аэрогамма-спектрометрическая съемка. Методические рекомендации по аэрогамма-спектрометрическому обеспечению региональных прогнозно-металлогенических работ. – Л.: НПО «Рудгеофизика», 1987, – 119 с.
21. Вавилин Л. Н., Воробьев В. П., Ефимов А. В. Аэрогамма-спектрометрия в геологии. – Л.: Недра, 1982. – 271 с.

РАДИОИЗОТОПЫ В ГОЛОЦЕНОВОМ РАЗРЕЗЕ ШЕРСТОБИТОВСКОГО ВЕРХОВОГО БОЛОТА БАРАБИНСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ (ЮГ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

Г. А. Леонова[1], М. С. Мельгунов[1], К. А. Мезина[1], Ю. И. Прейс[2], А. Е. Мальцев[1], В. А. Бобров[1]

[1]Институт геологии и минералогии СО РАН
Новосибирск, Россия, leonova@igm.nsc.ru
[2]Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
Томск, Россия

RADIOISOTOPES IN THE HOLOCENE SECTION OF THE SHERSTOBITOVSKY RAISED BOG BARABINSKAYA FOREST-STEPPE (SOUTH WESTERN SIBERIA)

G. A. Leonova[1], M. S. Melgunov[1], K. A. Mezina[1], Yu. I. Preis[2], A. E. Maltsev[1], V. A. Bobrov[1]

[1]V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
Novosibirsk, Russia, leonova@igm.nsc.ru
[2]Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS
Tomsk, Russia

The specific activity of natural (^{7}Be, ^{210}Pb) and manmade (^{137}Cs) radioisotopes in the suspended matter of snow water was determined. The density of their precipitation on the surface of the Sherstobitovsky raised bog of the Barabinsk forest-steppe in winter period is estimated at the points of snow sampling. It was established that the main concentrator of ^{7}Be is a fine fraction of suspended matter (< 0.45 microns) consisting of colloids and a dissolved component. For $^{210}Pb_{atm}$ it is a coarse - grained fraction (> 3 microns) consisting of dust particles. The first data on the distribution of natural (^{238}U, ^{210}Pb, ^{226}Ra, ^{40}K) and man-made (^{137}Cs) radioisotopes in the raised bogs of the forest-steppe zone of Western Siberia were obtained using the example of the vertical profile of the Sherstobitovsky peat bog.

Введение

Торфяные залежи верховых болот считаются наиболее подходящими объектами для ретроспективных оценок атмосферного поступления радиоизотопов в доиндустриальную эпоху и на протяжении XX в. Погребенные залежи сфагнового торфа сохраняют радиоизотопный состав в приповерхностных стратифицированных горизонтах, отражая геохимическую характеристику атмосферных выпадений в прошлом и настоящем [1, 3]. На территории лесостепной зоны Западной Сибири на южной границе ареала распространения верховых болот расположены сосново-кустарничково-сфагновые болота (рямы), имеющие характер фрагментов верховых болот, вкрапленных в низинные болота. Эти реликтовые рямовые комплексы испытывают наибольшее влияние изменения климата и антропогенного воздействия [5]. В современной литературе отсутствуют данные об атмосферном поступлении радиоизотопов ^{7}Be, ^{210}Pb и техногенного радионуклида ^{137}Cs на поверхность рямов Барабинской лесостепи и распределения их по разрезам торфяных залежей. Это и послужило для авторов причиной начать исследования в рамках регионального проекта РФФИ № 17-45-540063 р_а.

Целью данной работы явилось изучение атмосферного поступления ^{7}Be, ^{210}Pb и ^{137}Cs на поверхность Шерстобитовского торфяника Барабинской лесостепи и распределения в его разрезе естественных (^{238}U, ^{210}Pb, ^{226}Ra, ^{40}K) и техногенного ^{137}Cs радиоизотопов.

Материалы и методы

Шерстобитовский рям (координаты 54°58'58'' с. ш., 81°00'58'' в. д.) находится в Чулымском районе Новосибирской области у с. Шерстобитово и отнесен к памятникам природы областного значения. В сентябре 2017 г. пробоотборочным буром БТГ-1 получен керн торфа (40 см) с ненарушенной стратификацией. В марте 2018 г. отобраны представительные пробы снега для оценки уровня атмосферного поступления радиоизотопов $^{210}Pb_{атм}$, ^{7}Be и ^{137}Cs на поверхность верхового болота. Образцы снега отбирались на всю глубину снежного покрова с фиксированной площади отбора. Это позволило получить усредненную информацию об атмосферных выпадениях за 4-х месячный зимний период устойчивого снегонакопления. Объем образцов составлял 40 л снега, из которых при таянии получалось до 20 л талой воды. Пробоподготовка образцов для анализа заключалась в отстаивании талой воды до выпадения крупной фракции взвешенного вещества в осадок с последующей декантацией (сливание раствора с осадка). Затем проводили последовательное фильтрование декантированного раствора для отделения мелкодисперсных твердых фракций через два фильтра: «синяя лента» (размер пор 3 мкм) и мембранный фильтр 0,45 мкм. Это позволило выделить две компоненты взвешенного вещества размерностью более 3 мкм и от 3 до 0,45 мкм, представляющие пылевые частицы различных размеров. Выделение фракции,

Таблица 1. Удельные активности взвешенного вещества снеговой воды и плотности выпадения радиоизотопов в точках отбора образцов снега на Шерстобитовском ряме

Образец	Фракция	Плотность выпадения, Бк/м²			Удельная активность, мБк/л*			$^{7}Be/^{210}Pb_{атм}$
		$^{210}Pb_{атм}$	^{7}Be	^{137}Cs	$^{210}Pb_{атм}$	^{7}Be	^{137}Cs	
Шерстобитовский рям	1	9,7	6,8	0,11	90	64	1,1	0,71
	2	18,7	13,8	0,16	175	129	1,5	0,74
	3	3,6	2,7	0,07	34	25	0,67	0,74
	4	4,9	30,6	0,27	46	287	2,5	6,2
Сумма		**36,9**	**53,9**	**0,61**	**345**	**505**	**5,77**	**1,5**

1 – крупнозернистая фракция (вещество > 3 мкм после декантации); 2 – фракция > 3 мкм (вещество, осевшее при фильтровании снеговой воды на фильтр «синяя лента»); 3 – мелкодисперсная фракция 0,45–3 мкм (вещество, осевшее при последовательном фильтровании через мембранный фильтр); 4 – мелкодисперсная фракция < 0,45 мкм (коллоидная и растворенная составляющие); * – снеговая вода.

содержащей наночастицы размерностью менее 0,45 мкм коллоидной и растворенной составляющих, проведено выпариванием отфильтрованного через мембранный фильтр раствора до сухого остатка.

Определение активности радиоизотопов уранового ряда (^{238}U (^{234}Th), ^{226}Ra, ^{210}Pb), ^{137}Cs, ^{40}K и ^{7}Be в твердой фазе образцов проводилось методом высокоразрешающей полупроводниковой гамма-спектрометрии с использованием HPGe низкофоновых детекторов колодезного типа EGPC192-P21-R (EURISYS MESURES) и GWL-220-15 (ORTEC). Рабочий объём детекторов ~ 200 $см^3$, разрешение лучше 2,1 кэВ на энергии 1,33 МэВ. Методика, подробно описанная в работах [6], учитывает влияние ряда мешающих факторов: геометрии измерения, плотности анализируемого образца, наложения мешающих пиков и эффекта каскадного суммирования аналитических гамма-линий.

Результаты и их обсуждение

Радиоизотопный состав атмосферных выпадений (снеговая вода). На основе полученных аналитических данных по содержанию $^{210}Pb_{атм}$, ^{7}Be и ^{137}Cs в образцах снега были рассчитаны удельные активности и плотности выпадения радиоизотопов в точках пробоотбора на Шерстобитовском ряме. Полученные результаты соответствуют суммарному атмосферному поступлению радиоизотопов за 4-х месячный зимний период устойчивого снегонакопления. Все данные приведены к дате отбора проб снега 11 марта 2018 г. (табл. 1). Удельные активности $^{210}Pb_{атм}$, ^{7}Be и ^{137}Cs в снеговой воде с учетом вклада всех гранулометрических фракций взвешенного вещества для образцов снега составляют 345, 505 и 5,77 мБк/л соответственно. Рассчитаны величины плотностей выпадения $^{210}Pb_{атм}$ (36,9 Бк/м²) и 7Be (53,9 Бк/м²) на поверхность Шерстобитовского ряма. Следует отметить низкую по сравнению с $^{210}Pb_{атм}$ и ^{7}Be удельную активность ^{137}Cs (5,778 мБк/л) во взвешенном веществе сгеговых вод. Это говорит о незначительном современном поступлении этого техногенного радионуклида из атмосферы на поверхность болота.

Изучен долевой вклад гранулометрических фракций взвешенного вещества снеговых вод в общую удельную активность $^{210}Pb_{атм}$ и ^{7}Be (табл. 2).

Сравнительный анализ вкладов гранулометрических фракций показал, что:

1) Большая часть ^{7}Be (46–57 %) связана с мелкодисперсной фракцией взвешенного вещества размерностью менее 0,45 мкм. Доля крупнозернистой фракции взвешенного вещества в общей активности ^{7}Be составляет для Шерстобитовского ряма – 38 %.

2) Основная доля $^{210}Pb_{атм}$ (77–79 %) в изученных образцах взвешенного вещества снеговой воды находится в составе крупнозернистой фракции, в основном представленной пылевыми частицами различной размерности.

Распределение радиоизотопов в вертикальном профиле Шерстобитовского торфяника. Впервые для верховых болот лесостепной зоны Западной Сибири получены данные по распределению естественных (^{238}U, ^{210}Pb, ^{226}Ra, ^{40}K) и техногенного (^{137}Cs) радиоизотопов в разрезе Шерстобитовского торфяника (табл. 3).

Таблица 2. Доля гранулометрических фракций (%) взвешенного вещества образцов снега в общей активности исследуемых радиоизотопов

	Фракция	$^{210}Pb_{атм}$	^{7}Be	^{137}Cs
Шерстобитовский рям	1–2	77	38	44
	3	10	5	12
	4	13	57	44

1–2 – сумма фракций, где 1 – вещество > 3 мкм, оставшееся после декантации и 2 – вещество > 3 мкм, осевшее при фильтровании снеговой воды на фильтр «синяя лента»; 3 – мелкодисперсная фракция 0,45–3 мкм (вещество, осевшее при последовательном фильтровании через мембранный фильтр); 4 – мелкодисперсная фракция < 0,45 мкм (коллоидная и растворенная составляющие).

Таблица 3. Содержания радиоизотопов в профиле Шерстобитовского торфяника

Интервал, см	U-238	U	Ra-226	Pb-210	K-40	K_2O	Cs-137	Ra/U
	Бк/кг	г/т	Бк/кг	Бк/кг	Бк/кг	%	Бк/кг	
0–2	14	1,1	18	593	42	0,17	54	1,3
2–4	2,6	0,2	17	585	< 25	< 0,10	54	6,5
4–6	2,8	0,2	16	619	71	0,28	99	5,7
6–8	6,7	0,5	25	478	114	0,45	169	3,7
8–10	6,5	0,5	25	333	42	0,17	35	3,8
10–12	11	0,9	15	224	35	0,14	17	1,4
12–14	< 2,5	< 0,2	17	176	< 25	< 0,10	15	> 6,8
14–16	< 2,5	< 0,2	19	112	27	0,11	15	> 7,6
16–18	< 2,5	< 0,2	20	110	< 25	< 0,10	12	> 8,0
18–20	< 2,5	< 0,2	28	108	< 25	< 0,10	12	> 11,2
20–22	< 2,5	< 0,2	18	120	< 25	< 0,10	18	> 7,2
22–25	< 2,5	< 0,2	18	111	49	0,19	33	> 7,2
25–30	10	0,8	21	121	30	0,12	31	2,1
30–35	16	1,3	24	38	< 25	< 0,10	9	1,5
35–40	< 2,5	< 0,2	21	22	< 25	< 0,10	6	> 8,4

Массовые содержания U и K_2O рассчитаны через удельные активности ^{238}U и ^{40}K, исходя из соотношений: активность 1 мг U соответствует 12,432 Бк U^{238}; 1 % K_2O – 251,61 Бк ^{40}K.

Для исследованной залежи Шерстобитовского торфяника наблюдается нарушение радиоактивного равновесия между ^{238}U и ^{226}Ra в пользу последнего. По глубине изученного разреза $^{226}Ra/^{238}U$ отношение имеет значения больше единицы, варьируя в пределах от 1,3 в горизонте 0–2 до 11,2 (18–20 см). Такие же величины $^{226}Ra/^{238}U$ отношений характерны и для основных компонентов биогеоценоза, формирующих торфяную залежь. Полученные авторами результаты содержаний радиоактивных элементов в компонентах биогеоценоза Убинского ряма (Барабинская лесостепь) показывают, что нарушение радиоактивного равновесия в пользу ^{226}Ra в паре U–Ra наблюдается для всех изученных образцов. В лесной подстилке и верхнем, дерновом горизонте почв ^{226}Ra в 1,59 раз больше его равновесных содержаний. Еще более высокий избыток ^{226}Ra наблюдается в зеленом мхе *Polytrichum commune Hedw.* (1,7) и сфагновом мхе *Sphagnum magellanicum* (2,13).

Форма кривой распределения ^{210}Pb по глубине Шерстобитовского торфяника позволяет провести датирование верхних горизонтов до глубины 35 см (рис. 1, табл. 4).

Неравновесный ^{210}Pb (Pbex), постоянно выпадающий на поверхность из атмосферы, часто используется для датирования верхних слоев стратифицированных отложений возрастом до 150–200 лет [7–9]. ^{210}Pb (период полураспада $T_{1/2}$ = 22,3 года) – естественный радиоизотоп, входящий в радиоактивный ряд ^{238}U. Источником Pbex в атмосфере является ^{222}Rn, который будучи продуктом распада ^{226}Ra и газом, эманирует с земной поверхности. Имея период полураспада ($T_{1/2}$) 3,82 дня, ^{222}Rn в течение короткого промежутка времени через ряд короткоживущих изотопов распадается в ^{210}Pb. В момент образования атомы радона и продукты его распада электрически заряжены, что приводит к их сорбции аэрозольными и пылевыми частицами в атмосфере, в составе которых Pbex непрерывно оседает на земную поверхность. Попавший на поверхность торфяной залежи Pbex постепенно перекрывается более молодыми образованиями. При отсутствии процессов, приводящих к вертикальной миграции, дальнейшая судьба захороненного Pbex определяется законом его радиоактивного распада. Это и лежит в основе методов датирования верхних горизонтов торфяников по неравновесному ^{210}Pb на основе модели постоянного потока Pbex (CRS — Constant Rate of Supply) [7, 8]. Эта модель предполагает наличие двух основных начальных условий: 1) Скорость выпадения Pbex из атмосферы является величиной постоянной на протяжении всего периода накопления торфа; 2) Значимое вертикальное перераспределение Pbex после его захоронения отсутствует. Модель учитывает изменение темпов наращивания биомассы.

Согласно CRS модели возраст нижней поверхности датируемого горизонта торфа рассчитывается согласно формуле [7, 9]:

$$t(i) = \lambda^{-1} \ln(A(0)/A(i)) \quad (1),$$

где i – номер датируемого горизонта, λ – постоянная распада ^{210}Pb (год$^{-1}$), A(0) – кумулятивный запас Pbex

Таблица 4. Возрастные характеристики верхней части Шерстобитовского торфяника

Интервал	P	Ci	i	Ai	A(i)	t(i)	Год форм-я	r(i)
См	гр $см^{-3}$	Бк $кг^{-1}$	см	Бк $м^{-2}$	Бк $м^{-2}$	лет		гр $см^{-2}$ $год^{-1}$
			0	0	2762	0	2013	
0–2	0,0353	575	2	406	2356	5	2008	129
2–4	0,0353	568	4	401	1955	11	2002	104
4–6	0,0364	603	6	439	1516	19	1994	90
6–8	0,0375	453	8	340	1176	27	1986	96
8–10	0,0375	308	10	231	945	34	1979	114
10–12	0,0411	209	12	172	773	41	1972	131
12–14	0,0411	159	14	131	642	47	1966	159
14–16	0,0394	93	16	73	569	51	1962	194
16–18	0,0376	90	18	68	502	55	1958	184
18–20	0,0376	80	20	60	441	59	1954	151
20–22	0,0422	102	22	86	355	66	1947	114
22–25	0,0422	93	25	118	238	79	1934	77
25–30	0,0404	100	30	202	36	140	1873	19
30–35	0,0470	14	35	33	3	223	1790	11
35–40	0,0524	1	40					

P – плотность сухого вещества торфа в интервале; Ci – удельная активность Pbex в интервале; i – датируемый горизонт; Ai – запас Pbex в интервале; A(i) – кумулятивный запас Pbex ниже датируемого горизонта; r(i) – скорость накопления сухого торфа.

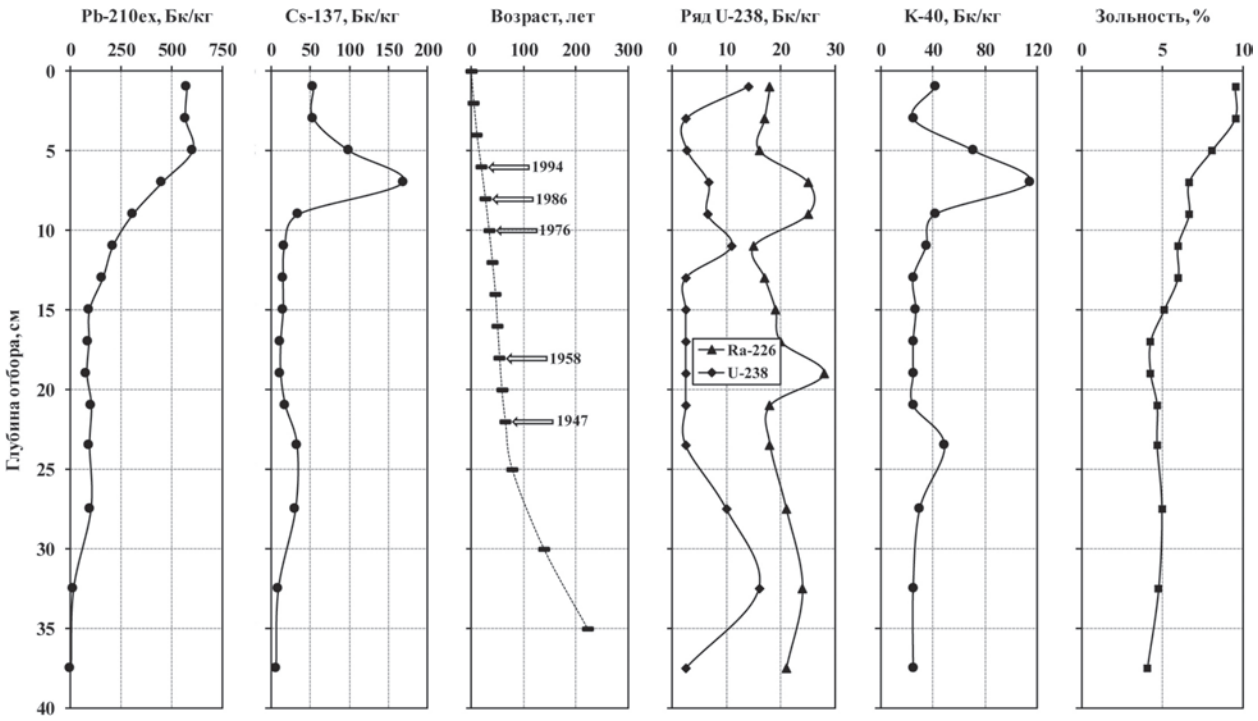


Рис. 1. Вертикальное распределение радиоактивных элементов и возрастные характеристики верхней части Шерстобитовского торфяника

в датируемом разрезе торфяника (Бк м$^{-2}$), A(i) – кумулятивный запас Pbex ниже датируемого горизонта (Бк м$^{-2}$).

Кумулятивный запас Pbex рассчитывается через удельные активности ^{210}Pb, определенные для каждого горизонта датируемого разреза использованным аналитическим методом, с учетом данных о плотности сухого вещества торфяника. Активность неравновесного (атмосферного) Pbex равна разности полной активности ^{210}Pb, находящегося в образце, и активности ^{210}Pb, состоящего в радиоактивном равновесии с материнским ^{226}Ra. Модель CRS также позволяет провести оценку скоростей накопления сухого материала торфа, для определения которой можно использовать формулу:

$$r(i) = \lambda A(i)/C(i)) \quad (2),$$

где C(i) – удельная активность Pbex на поверхности, разделяющей i и i + 1 датируемые слои.

Использование модели CRS позволило провести надежное датирование до горизонта 30 см, которому соответствует возраст 140 лет (табл. 4).

Верификацию правильности использованного подхода можно провести по характеру распределения техногенного ^{137}Cs, поступление которого в торфяную залежь связано с локальными и глобальными выпадениями из атмосферы в результате проведения открытых ядерных испытаний на Семипалатинском и других полигонах в период с 1949 по 1963 гг., аварий на Чернобыльской (1986 г.) и Фукусимской (2011 г.) атомных электростанциях.

На графике распределения ^{137}Cs по разрезу Шерстобитовского торфяника установлено наличие двух пиков ^{137}Cs (рис. 1). В нижней части разреза верхняя граница и максимум пика активности вполне вероятно соответствует возрастному рубежу 1949–1963 годов (времени массовых ядерных испытаний). Некоторая размытость пика связана, по-видимому, с механизмами перераспределения ^{137}Cs в связи со значительными колебаниями уровня болотных вод (УБВ), как сезонных, так и годовых, согласно [3]. Смещению этого пика, то есть диффузии ^{137}Cs в нижележащие слои могло способствовать повышение обводненности болота в условиях направленного понижения температуры и повышения осадков в период с 1967 по 1986 гг., согласно данным по метеостанции Барабинск [2].

В верхней части графика наблюдается ярко выраженный пик ^{137}Cs, время формирования максимума которого определяется интервалом 1986–1990 гг. Частично такое увеличение удельной активности ^{137}Cs можно было бы связать с выпадениями, связанными с аварией на Чернобыльской АЭС, но только этой причиной столь значимое увеличение объяснить нельзя. Скорее всего, здесь на незначительный вклад Чернобыльской компоненты наложилось влияние других источников поступления ^{137}Cs – эффект колебания УБВ в условиях аридизации климата. Согласно данным по метеостанции Барабинск [2], с 1987 до 2009 гг. повышались температуры воздуха и понижалось количество осадков как среднегодовых, так и летних. В условиях аридизации климата УБВ резко понижался в теплые сезоны года, а транспирация болотными растениями (испарение воды через устьица листьев) в жарких сухих условиях обусловливала активное подтягивание болотных вод перенос корнями растений из нижезалегающих торфяных горизонтов биофильного элемента ^{40}K и его геохимического аналога ^{137}Cs [4]. Особенно активно этот процесс замещения происходит на верховых болотах, для которых характерен дефицит калия. Поэтому, вполне вероятно, что пик ^{137}Cs на глубине 8 см в значительной степени обусловлен переносом основного количества ^{137}Cs, отложившегося в 1949–1963 гг., в вышезалегающие горизонты. Это подтверждается данными, полученным авторами с помощью Автоматического регистратора УБВ (АКР4-логер), который выявил значительные сезонные колебания УБВ Шерстобитовского ряма с сентября 2017 по сентябрь 2018 гг. В период снеготаянья УБВ поднялся с 80 см (март 2018 г.) до 35 см (апрель) и продолжал подниматься до 10 см от поверхности (май). Самые высокие значения стояния УБВ (10 см от поверхности) зарегистрированы в весенний период, что соответствует верхнему пику ^{137}Cs.

Заключение

Оценка возраста верхней части Шерстобитовского торфяника, проведенная по неравновесному ^{210}Pb, позволила установить факт перераспределения ^{137}Cs и ^{40}K со смещением к верхним горизонтам. Такое перераспределение можно связать с тремя процессами: сезонным колебанием УБВ, подтягиванием корнями болотных растений при возрастании транспирации (испарения) воды через устьица листьев в сухое время года.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при частичной финансовой поддержке регионального проекта РФФИ № 17-45-540063р_а.

Литература

1. Бобров В. А. Природные и техногенные радиоизотопы и микроэлементы в разрезе торфяной залежи верхового болота Дулиха (Прибайкалье): ретроспективные оценки атмосферного поступления минерального вещества / В. А. Бобров, В. В. Будашкина, М. С. Мельгунов, Г. А. Леонова,

А. Е. Мальцев // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, 2019. – № 2 (38). – С. 93–102.
2. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. URL: http://aisori.meteo.ru/ClimateR (дата обращения: 11.05.2020).
3. Ефремова Т. Т. Аккумуляция ^{137}Cs в болотах междуречья Оби и Томи / Ф. В. Сухоруков, С. П. Ефремов, В. В. Будашкина // Почвоведение, 2002. – № 1. – С. 100–107.
4. Кабата-Пендиас А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас., Х. Пендиас. – М.: Мир, 1989. – 439 с.
5. Леонова Г. А. Геоэкологическая оценка степени антропогенного загрязнения тяжелыми металлами экосистем верховых болот лесостепной зоны Западной Сибири / Г. А. Леонова, А. Е. Мальцев, Ж. О. Бадмаева, А. С. Шавекин, М. В. Рубанов, Ю. И Прейс // Экология промышленного производства, 2018. – Вып. 2 (102). – С. 64–73.
6. Мельгунов М. С. Аномалии радиоактивности на южном побережье озера Иссык-Куль (Кыргызстан) / М. С. Мельгунов, В. М. Гавшин, Ф. В. Сухоруков, И. А. Калугин, В. А. Бобров, J. Klerkx // Химия в интересах устойчивого развития, 2003. – Т. 11.– № 6. – С. 869–880.
7. Appleby P.G. Chronostratigraphic techniques in recent sediments // Tracking environmental change using lake sediments. – Springer, Dordrecht, 2002. – P. 171–203.
8. Appleby P. G. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment / P. G. Appleby, F. Oldfield // Catena, 1978. – Vol. 5. – № 1. – P. 1–8.
9. Sanchez-Cabeza J. A. ^{210}Pb sediment radiochronology: an integrated formulation and classification of dating models / J. A. Sanchez-Cabeza, A. C. Ruiz-Fernández // Geochimica et Cosmochimica Acta, 2012.– Vol. 82. – P. 183–200.

ВАРЬИРОВАНИЕ УДЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ГОРИЗОНТАХ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ

Д. Н. Липатов, Д. В. Манахов, С. В. Мамихин

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, Россия, dlip@soil.msu.ru, dman@soil.msu.ru, svmamikhin@mail.ru

VARIATION OF SPECIFIC ACTIVITY OF NATURAL RADIONUCLIDES IN DIAGNOSTIC HORIZONS SOD-PODZOLIC SOILS

D. N. Lipatov, D. V. Manakhov, S. V. Mamikhin

Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia, dlip@soil.msu.ru, dman@soil.msu.ru, svmamikhin@mail.ru

An increase in the activity of Ra-226, Th-232, K-40 in the lower horizons is typical for sod-podzolic soils on cover loams, underlain by moraine loams, and a decrease – for those underlain by sandy fluvioglacial deposits. In the upper layer of agro-sod-podzolic soils, the distribution of natural radionuclides shows eluvial signs and reflects the intensity of postagrogenic transformation processes. The coefficients of variation of the activity of Ra-226, Th-232, K-40 in the diagnostic horizons AY, AEL, Ap are 3.5–16.0 %, and in the lower horizons BEL, BT, BC, C, BD, D increase to 25–55 %.

Введение

Региональные уровни удельных активностей Ra-226, Th-232, K-40 в почвах определяются концентрацией этих элементов в почвообразующих породах [3]. Однако почвенные процессы могут изменять характер вертикального распределения естественных радионуклидов (ЕРН) [1, 5]. Важной задачей является анализ распределения и варьирования удельных активностей ЕРН в диагностических горизонтах и профилях отдельных типов почв.

В дерново-подзолистых почвах отчетливо проявляются элювиально-иллювиальные процессы. В полугидроморфных условиях эти почвы подвержены также процессам оглеения. В агродерново-подзолистых почвах распределение ЕРН, унаследованное от природных аналогов, изменяется вследствие формирования пахотного горизонта и долгосрочного применения фосфорных удобрений, характеризующихся высокими уровнями удельной активности радионуклидов ряда U-238–Ra-226. Градиенты распределения подвижных форм Ra-226, Th-232, K-40 могут трас-

сировать интенсивность почвенных, геохимических и агрогенных процессов, поэтому оценка средних уровней и диапазонов варьирования естественных радионуклидов в пределах диагностических горизонтов и при переходах между ними является актуальной исследовательской задачей.

Материалы и методы

Исследования проводились в 2016–2018 гг. в Солнечногорском районе Московской области на территории Учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ имени М. В. Ломоносова «Чашниково» вблизи одноименной деревни. Почвенные разрезы были заложены в лесных биогеоценозах и близлежащих агроценозах на серии катен с географическими координатами: 56,04347° с. ш. 37,17250° в. д. – 56,02639° с. ш. 37,19930° в. д.; 56,03912° с. ш., 37,16787° в. д. – 56,04172° с. ш., 37,16918° в. д. Описание морфологического строения профилей с выделением диагностических горизонтов и таксономическим названием почв проводилось на основе Классификации почв России [2].

Пробоотбор в почвенных разрезах выполнялся по генетическим горизонтам, а в пределах горизонтов – по 10–20-сантиметровым слоям. В лабораторных условиях пробы высушивались, помещались в измерительные сосуды Маринелли и герметизировались, в них измеряли удельную активность Ra-226, Th-232, K-40 на сцинтилляционном гамма-спектрометре с детектором NaI(Tl) 63 × 63 «Мультирад».

Результаты и их обсуждение

На исследованной территории площадью около 4 км^2 преобладают лесные биогеоценозы: ельники, дубово-еловые и елово-березовые леса. Агроценозы представлены 10–20-летними залежами, на которых произрастают разнотравно-злаковые фитоценозы. Выявлены различные подтипы дерново-подзолистых и агродерново-подзолистых почв.

В дерново-подзолистой легкосуглинистой почве на покровном суглинке, подстилаемом мореной, отмечено равномерное распределение Ra-226, Th-232, K-40 в верхней и средней части профиля (рис. 1). Локальный минимум в горизонте EL сформирован элювиальными процессами, при этом некоторая доля подвижных соединений ЕРН переместилась в нижележащие горизонты BT и BCt. Увеличение удельных активностей Ra-226, Th-232, K-40 в горизонте BCt и их уменьшение в нижележащем горизонте D связано с профильным изменением гранулометрического и минералогического состава почвообразующей породы и подстилающих моренных суглинков.

В дерново-подзолистой почве на покровном суглинке, подстилаемом флювиогляциальными отложениями, распределение Ra-226, Th-232, K-40 неоднородно (рис. 2). В пределах верхней толщи, включающей горизонты AY, AEL и EL, распределение Ra-226 имеет равномерный характер с уровнем удельной активности 26–28 Бк/кг. Удельная активность Th-232 и K-40 увеличивается в горизонте EL. В средней части профиля в горизонте BEL отмечается резкое почти двукратное уменьшение удельных активностей исследованных ЕРН. В глубоких слоях почвы они продолжают уменьшаться, но плавно, доходя в горизонте D до минимальных значений: Ra-226 – 8 Бк/кг, Th-232 – 7 Бк/кг, K-40 – 257 Бк/кг. Такой значительный градиент связан с переходом к песчаной флювиогляциальной подстилающей породе, ее минералогический состав отличается от покровных и моренных суглинков.

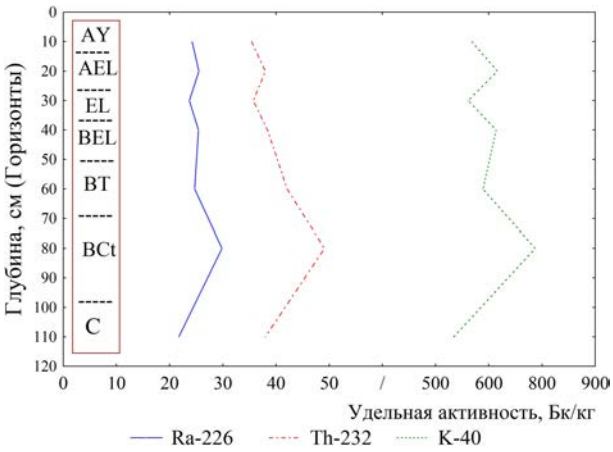


Рис. 1. Распределение удельной активности Ra-226, Th-232, K-40 в профиле дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы на покровном суглинке, подстилаемом мореной

В дерново-подзолисто-глеевой конкреционной почве распределение Ra-226, Th-232, K-40 относится к элювиально-иллювиальному типу (рис. 3). В подзолисто-элювиальном горизонте ELnn зафиксированы наименьшие значения удельных активностей ЕРН. В вышележащем горизонте AEL удельная активность ЕРН выше, но их аккумуляция в горизонте AY не отмечена. В иллювиально-глеевом горизонте BTg наблюдается резкое увеличение удельных активностей, в нижележащем глеевом горизонте G продолжается их плавное увеличение. Такое распределение сформировано элювиально-иллювиальными процессами с выносом подвижных форм Ra-226 и Th-232 из подзолисто-элювиального горизонта и их аккумуляцией в иллювиально-глеевом и глеевом горизонтах.

В агродерново-подзолистой почве на 15-летней залежи распределение Ra-226, Th-232, K-40 имеет неоднородный характер в верхней и средней частях профиля (рис. 4). В пределах старопахотного горизонта Ap зафиксированы два локальных минимума удельных активностей ЕРН: на глубине 10 и 20 см. Для распределения Th-232 наиболее четко выражен максимум удельной активности в подпахотном горизонте BEL. Такие особенности профильного распределения ЕРН в старопахотном горизонте обусловлены,

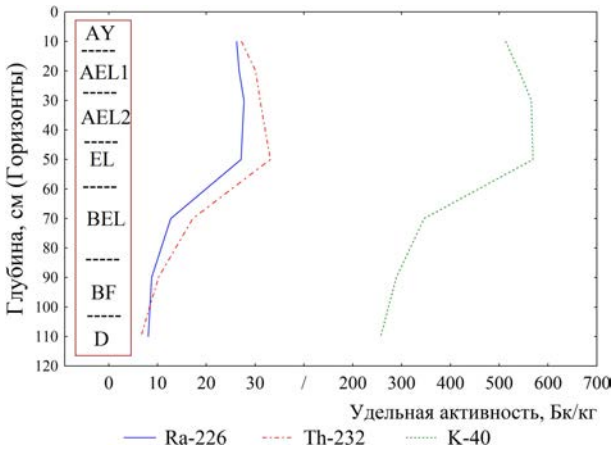


Рис. 2. Распределение удельной активности Ra-226, Th-232, K-40 в профиле дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы на покровном суглинке, подстилаемом флювиогляциальными отложениями

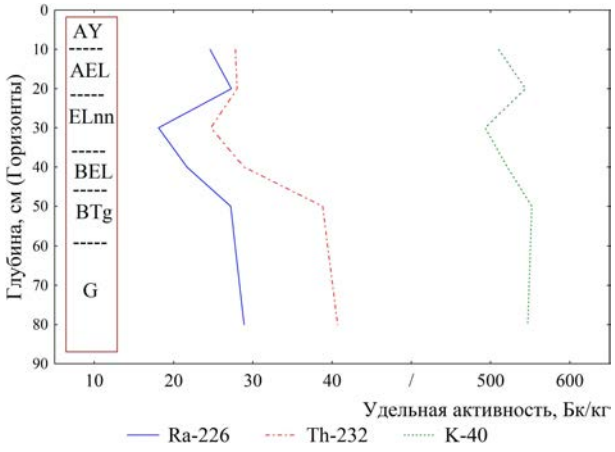


Рис. 3. Распределение удельной активности Ra-226, Th-232, K-40 в профиле дерново-подзолисто-глеевой конкреционной легкосуглинистой почвы на покровном суглинке

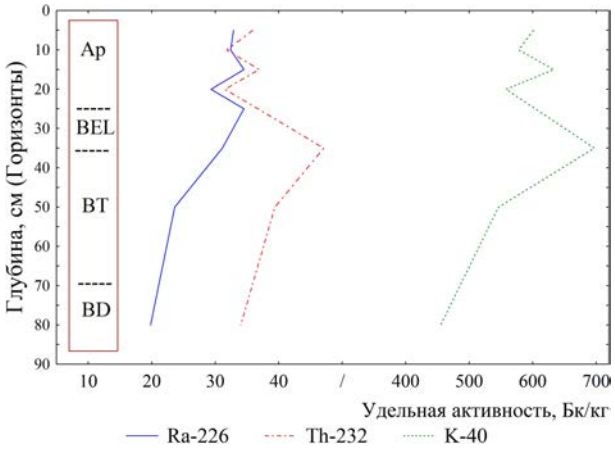


Рис. 4. Распределение удельной активности Ra-226, Th-232, K-40 в профиле агродерново-подзолистой легкосуглинистой почве на покровном суглинке, подстилаемом мореной

по-видимому, процессами постагрогенной трансформации в условиях многолетней залежи. Можно предполагать, что локальные минимумы удельных активностей Ra-226, Th-232, K-40, зафиксированные в различных слоях старопахотного горизонта, сформировались вследствие элювиальных процессов в постагрогенный период. При этом накопление ЕРН может происходить в подпахотном горизонте BEL. В средней и нижней частях профиля агродерново-подзолистой почвы значения удельных активностей ЕРН постепенно уменьшаются при переходе к горизонту BT и подстилающей породе BD.

Полученные результаты позволяют предполагать, что в постагрогенных условиях естественные радионуклиды (Ra-226, Th-232, K-40) активно вовлекаются в процессы дифференциации верхней части профиля залежной агродерново-подзолистой почвы. Этому способствует мобильность подвижных форм Ra-226 и высокие коэффициенты биологического поглощения K-40 растениями агрофитоценоза. Поэтому эти естественные радионуклиды могут рассматриваться в качестве трассеров, отражающих возраст залежи и интенсивность процессов постагрогенной трансформации, на основе степени неоднородности и особенностей распределения по старопахотному горизонту.

В целом, для исследованных дерново-подзолистых почв наибольшие значения удельных активностей ЕРН выявлены в горизонтах BTg, G, BCt, имеющих средне- и тяжелосуглинистый гранулометрический состав, а наименьшие – в горизонте D, сформированном песчаной флювиогляциальной подстилающей породой.

На исследованной территории 4 км2 диапазоны пространственного варьирования удельных активностей Ra-226, Th-232, K-40 в отдельных диагностических горизонтах почв зависят от их глубины залегания. Узкие диапазоны варьирования отмечены для верхних горизонтов AY и AEL, а также для старопахотного горизонта Ap (табл. 1). При этом отмечаются низкие коэффициенты вариации удельных активностей Ra-226, Th-232, K-40 в этих диагностических горизонтах AY, AEL, Ap – 3,5–16,0 %. В горизонте BEL и нижележащих горизонтах степень варьирования удельных активностей естественных радионуклидов увеличивается, и коэффициенты вариации возрастают до 25–55 %. Это связано с неоднородным составом почвообразующих и подстилающих пород. Горизонт D на флювиогляциальной породе, характеризуясь низкими значениями удельной активности Ra-226, Th-232, K-40, определяет увеличение контрастности этих показателей в нижней и средней толще дерново-подзолистых почв, сформировавшихся на этой территории.

В исследованных горизонтах наибольшие коэффициенты вариации выявлены для удельной активности Th-232 и отражают локальную аккумуляцию этого радионуклида в условиях элювиально-иллюви-

Таблица 1. Статистические показатели пространственного варьирования удельной активности естественных радионуклидов в почвенных горизонтах дерново-подзолистых почв на исследованной территории

Почвенные горизонты	Статистические показатели	Удельная активность радионуклидов, Бк/кг		
		Ra-226	Th-232	K-40
AY (n = 8)	Среднее	23,5	28,4	512
	Минимум	20,7	24,6	471
	Максимум	26,2	35,4	568
	Квар., %	9,3	14,3	7,0
Ap (n = 19)	Среднее	26,5	36,3	578
	Минимум	21,2	31,5	521
	Максимум	34,5	44,9	665
	Квар., %	16,0	9,1	6,6
AEL (n = 7)	Среднее	26,8	31,8	567
	Минимум	25,5	28,0	541
	Максимум	27,7	38,0	616
	Квар., %	3,6	13,6	6,1
EL, ELnn (n = 6)	Среднее	21,9	30,0	521
	Минимум	18,1	24,7	462
	Максимум	27,1	35,7	569
	Квар., %	19,4	17,4	10,0
BEL (n = 10)	Среднее	21,6	33,7	536
	Минимум	11,4	15,8	343
	Максимум	31,1	47,1	697
	Квар., %	30,4	35,0	23,9
BT (n = 7)	Среднее	23,9	39,5	558
	Минимум	20,7	32,6	483
	Максимум	27,2	46,1	657
	Квар., %	11,6	11,3	10,8
BC, C (n = 5)	Среднее	21,3	38,4	563
	Минимум	18,2	32,5	526
	Максимум	29,8	49,1	687
	Квар., %	23,2	16,8	12,4
BD, D (n = 6)	Среднее	8,4	11,0	304
	Минимум	5,3	6,3	228
	Максимум	11,5	19,3	399
	Квар., %	29,9	55,4	26,0

n – объем выборки, Среднее – среднее арифметическое, Квар. – коэффициент вариации.

альных почвенных процессов. Низкие коэффициенты вариации и наиболее узкие диапазоны варьирования в отдельных горизонтах почв отмечены для K-40.

Удельные активности ЕРН в почвах мира варьируют в широких диапазонах, а в качестве среднемировых приняты следующие значения: Ra-226 – 30 Бк/кг, Th-232 – 35 Бк/кг, K-40 – 400 Бк/кг [4]. Средние удельные активности Ra-226, отмеченные на территории вблизи деревни Чашниково Солнечногорского района Московской области (табл. 1), были ниже среднемирового значения. Средняя удельная активность Th-232 для исследованных дерново-подзолистых почв близка к среднемировому значению. Средняя удельная активность K-40 в почвах исследованного района была в 1,3–1,4 раза выше среднемировых значений. Широкий размах варьирования удельных активностей ЕРН, выявленный в пределах

отдельных почвенных горизонтов необходимо учитывать при планировании пробоотбора в радиационных и геохимических исследованиях.

Заключение

Распределение Ra-226, Th-232, K-40 в профилях дерново-подзолистых и дерново-подзолисто-глеевых почв в лесных биогеоценозах унаследовано от почвообразующей и подстилающей породы, а также связано с различной выраженностью элювиально-иллювиальных процессов. Увеличение удельных активностей ЕРН в нижних горизонтах характерно для дерново-подзолистых почв на покровных суглинках, подстилаемых моренными суглинками, а уменьшение – для подстилаемых песчаными флювиогляциальными отложениями. В верхней толще агродерново-подзолистых почв распределение ЕРН проявляет элювиальные признаки и отражает интенсивность процессов постагрогенной трансформации.

Исследования проводилось в рамках НИОКТР № АААА-А21-121012290189-8, выполняемой по государственному заданию и при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М. В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Литература

1. Безносиков В. А., Лодыгин Е. Д., Шуктомова И. И. Искусственные и естественные радионуклиды в почвах южно- и среднетаежных подзон Республики Коми // Почвоведение, 2017. – № 7. – С. 824–829.
2. Классификация и диагностика почв России. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
3. Титаева Н. А. Ядерная геохимия. 2-е изд. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 336 с.
4. Sources and effects of ionizing radiation. Vol. 1: Sources. United Nations scientific committee on the effects of atomic radiation (UNSCEAR). – United Nations Publication, New York, USA, 2000. – 654 p.
5. VandenBygaart A. J., Protz R. Gamma radioactivity in podzolic soils of Northern Ontario, Canada // J. Environ. Radioact., 1998. – V. 42. – P. 51–64.

ПРИМЕНЕНИЕ ФТОРИДОВ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

Д. С. Лобков, В. А. Карелин, А. В. Малин

Томский политехнический университет
Томск, Россия, danil08041999@mail.ru, vakarelin@tpu.ru, avm9@tpu.ru

APPLICATION OF FLUORIDES FOR REPROCESSING SNF FROM POWER REACTORS

D. S. Lobkov, V. A. Karelin, A. V. Malin

Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, danil08041999@mail.ru, vakarelin@tpu.ru, avm9@tpu.ru

The aim of the research is to study the process of reprocessing spent nuclear fuel using fluorine reagents as well as pure fluorine. The article considers the gas fluoride processing method and the method based on the dissolution of metal fuel elements in liquid halogen fluorides. Scien-tific innovation is the exploration of promising SNF processing techniques.

Введение

В настоящее время основную роль в переработке облученного ядерного топлива (ОЯТ) играют водные методы, включающие экстракционные процессы с применением ТБФ или других экстрагентов. Вместе с тем нет недостатка в предложениях использовать для тех же целей неводные или «сухие» методы: пирохимические и пирометаллургические.

К пирометаллургическим методам можно отнести:

1) экстрагирование урана или плутония расплавами металлов или их бинарными и тройными сплавами;

2) экстрагирование с использованием расплавов солевых систем;

3) фракционную дистилляцию;

4) зонную плавку;

5) электрорафинирование.

К пирохимическим методам, основанным на различной реакционной способности компонентов ТВЭЛов по отношению к фторирующим и хлорирующим реагентам и на различной летучести образуемых фторидов или хлоридов, относятся:

1) возгонка фторидов;

2) возгонка хлоридов;

3) растворение металлических ТВЭЛов в жидких галогенфторидах ClF_3, BrF_3;

4) растворение в солевых расплавах с последующим фторированием или хлорированием.

Предлагались также комбинированные методы, сочетающие гидрометаллургические и пирохимические процессы [1].

Из перечисленных методов представляют интерес газофторидный метод возгонки фторидов урана и плутония, перспективный для переработки облученных ТВЭЛов реакторов на быстрых нейтронах, и растворение металлических ТВЭЛов в жидких галогенфторидах ClF_3 и BrF_3, исключающий опасность перегрева реагирующей массы и ее воспламенения, благо-даря высокой теплопроводности жидкостей и возможности достижения больших коэффициентов теплоотдачи от жидкости к стенке реактора.

Газофторидный метод переработки ТВЭЛов

Газофторидиый метод основан на образовании и возгонке образующихся в результате фторирования высоколетучих фторидов урана и плутония, что позволяет отделять их от основной массы продуктов деления (ПД). Такой высокой летучестью обладают высшие фториды урана и плутония – гексафториды урана и плутония. Поэтому из шести известных бинарных фторидов урана (UF_3, UF_4, UF_5, U_2F_9, U_4F_{17} и UF_6) наиболее важны гексафториды. Меньшую роль играют PuF_3, PuF_4 и PuF_6.

Гексафториды урана и плутония во многом схожи. Они являются летучими уже при сравнительно невысоких температурах, близки их точки плавления, кипения и теплоты испарения. Однако их химические свойства существенно отличаются, из-за чего гексафторид плутония разлагается значительно легче, чем гексафторид урана.

Получить гексафториды урана и плутония можно используя различные фторирующие реагенты, например галогенфториды или элементный фтор. Элементный фтор – более подходящий реагент, поэтому на его применении основан газофторидиый способ переработки облученных ТВЭЛов.

Скорость фторирования диоксида плутония значительно ниже скорости фторирования диоксида урана. Поэтому при фторировании смеси $UO_2 + PuO_2$, обычно применяемой в ТВЭЛах РБН, в первую очередь фторируется уран. И только после превращения большей его части в шекафторид начинается образование тетрафторида плутония. Это объясняется способностью гексафторида плутония вступать в обменную реакцию

$$PuF_6 + UF_4 – PuF_4 + UF_6$$

Поэтому при фторировании можно рассчитывать на удаление в газовую фазу сначала основной массы урана, а затем плутония (и нептуния) или можно подобрать такие условия проведения процесса фторирования, при которых уран превращался бы в гексафторид урана, а плутоний оставался в виде тетрафторида плутония.

Ниже излагаются результаты опытной проверки газофторидной технологии, проведенной на установке «Фрегат». Исследован вариант возгонки гексафторида урана с последующим отделением сопутствующих продуктов деления сорбцией на твердых сорбентах.

Продукт после вскрытия ТВЭЛов методом термического оплавления состоит из гранул, имеющих форму правильных цилиндрических втулок, которые при слабом механическом воздействии легко рассыпаются, образуя крупку. В этой крупке встречаются частицы диаметром примерно 2 мм, состоящие из стали, содержание которой в разных образцах варьируется в пределах 1–5 %. Исследования на установке выполнены, в двух вариантах: для топлива, прошедшего 3-месячную выдержку после выгрузки из реактора БОР-60, и для топлива после 6-месячной

Таблица 1. Радиохимическая характеристика отработавшего топлива реактора БОР-60

Время выдержки ТВЭЛов, мес	Удельное тепловыделение, Вт/кг	Удельная β-активность топлива, Ки/кг	Содержание радионуклидов, Ки/кг								
			^{144}Ce, ^{144}Pr	^{141}Ce	^{106}Ru, ^{106}Rh	^{103}Ru	^{137}Cs	^{134}Cs	^{95}Zr	^{95}Nb	^{90}Sr
3	95,8	28 740	6500	680	210	250	17,0	13,0	3150	6900	224,7
6	16,9	5600	2590	3,9	126	8	4,1	1,8	230	460	–

выдержки. Выгорание топлива в обоих случаях составляло 9,6 %. Удельная β-активность топлива 3-месячной выдержки достигала 28740 Ки/кг, удельная γ-активность 9,8 • 103 г-экв Ra/кг ^{235}U, удельное тепловыделение 95,8 Вт/кг. В результате топливо массой 1 кг, засыпанное в сосуд диаметром 100 мм, само разогревалось до 210 °С. Радиохимический состав исходного ядерного топлива после 3- и 6-месячиой выдержки приведен в табл. 1.

Возгонке гексафторида урана из облученного материала массой 1 кг производили в реакторе трубчатого типа периодическим методом. Топливо помещали на насадку из никелевого сплава и фторировали потоком поступавшего снизу элементного фтора. Процесс фторирования осуществлялся вначале смесью фтора с азотом, а затем концентрированным фтором. Температуру поддерживали на уровне 400 °С, за исключением ее повышения до 552 °С в начальный момент вследствие саморазогревания, что потребовало включения искусственного охлаждения до достижения заданной температуры.

В результате фторирования партии топлива массой 1,9 кг в реакторе осталось 0,28 кг твердого продукта – «шлака» светло серого темнеющего на воздухе сыпучего порошка плотностью 2,54 г/см^3. В порошке сохранились первоначальные включения крупинок стали, мало изменившиеся во время фторирования. Удельное тепловыделение твердого остатка от фторирования достаточно велико: для ТВЭЛов 3-месячной выдержки 552,3 Вт/кг и для ТВЭЛов, выдержанных в течение 6 мес – 75,5 Вт/кг. Выход твердых остатков составил соответственно 14,7 и 18 %.

Радиохимический состав твердых остатков после фторирования свидетельствует о том, что в них сохраняется 85–82 % исходной β-активности ТВЭЛов, в том числе практически 100 % радионуклидов стронция и лантана, 70–80 % нуклидов циркония, цезия, церия, прометия и т. д.

Из технологических газов, образующихся в процессе фторирования, при их прохождении через форконденсатор с развитой ребристой поверхностью при температуре 27 °С частично осаждались фториды радионуклидов рутения, циркония, ниобия и цезия. Затем газы проходили через очистительную сорбционную колонку с фторидом натрия, в которой поддерживали температуру 360–400 °С, при которой обеспечивалась дополнительная очистка от циркония, ниобия и рутения. Поскольку улавливания гексафторида урана в этих условиях не происходит, газовый поток, содержащий практически весь уран из исходных ТВЭЛов и остающиеся еще неуловленные примеси, поступал в следующую сорбционную колонку, в которой полностью и избирательно при 100 °С сорбировался гексафторид урана в виде $NaF • UF_6$. В газовой фазе остается избыток непрореагировавшего фтора, ксенон, летучие фториды теллура, технеция, иода, соединения рутения и др. Они поглощаются в следующей колонке, заполненной известковым химическим поглотителем (ХПИ) при 100 °С.

Гексафторид урана, поглощенный в сорбционной колонке, десорбируют при 400 °С смесью азота с 10 % фтора. При этом происходит его дополнительная очистка от остатков радионуклидов примесных элементов. Повторением цикла сорбция-десорбция с заключительной конденсацией гексафторида урана в твердый продукт достигается высокая степень

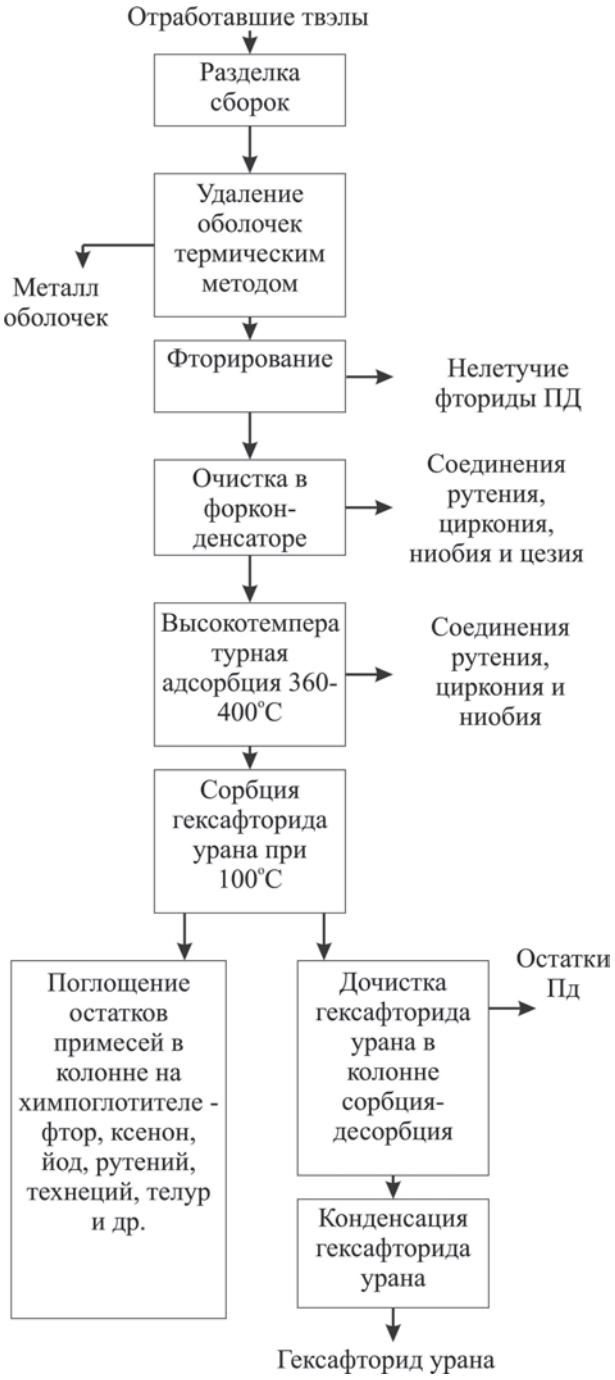


Рис. 1. Схема газофторидного метода переработки отработавших ТВЭЛов с применением очистки на твердых сорбентах [1]

очистки конечного целевого продукта – гексафторида урана. Следует подчеркнуть эффективность очистки гексафторида урана на стадии операции конденсации и переконденсации в транспортный контейнер. Принципиальная схема процесса регенерации ТВЭЛов реактора БОР-60 с использованием газофторидного метода показана на рис. 1.

Анализ распределения продуктов деления по аппаратам и промежуточным продуктам технологической схемы позволяет оценить примерный баланс такого распределения и сделать важные выводы с практической точки зрения. Из табл. 2 видно, что значительная часть радионуклидов, образующих нелетучие фториды, действительно накапливается в твердых отходах фторирования (до 85 %). При рассмотрении табл. 2 следует учитывать, что исследователям удалось свести баланс по большинству радионуклидов, за исключением рутения и ниобия. Замечено, что соединения ниобия осаждаются в основном на металлокерамическом фильтре, находящемся после реактора фторирования и в коммуникации до первой очистительной колонки. Фториды цезия мигрируют по технологической цепочке подобно газу. Максимальная активность в сбросных газах приходится на радионуклиды ксенона, минимальная – на радионуклиды циркония и ниобия. Активность радионуклидов, выбрасываемых с отходящими газами, не превышает 10–5 % от общей активности.

Количество извлеченного урана из облученного диоксида составило 99,4 %, а количество урана, извлеченного в очищенный гексафторид – 96,1 %. Потери урана с отходами 0,52 %. Суммарная β-активность гексафторида урана 3,5 • 10–6 Ки/г урана, γ-активность 3,1 г-экв Ra/г U. Основную долю в γ-излучение гексафторида урана вносят ^{235}U и ^{237}U. Коэффициенты очистки урана от радионуклидов циркония и ниобия составляют 109, от церия и празеодима 108, от цезия 107 и иода 105. Суммарный коэффициент очистки от всех β- и γ-излучателей более 106.

Таким образом газофторидный метод является перспективным процессом переработки облученного топлива реакторов на быстрых нейтронах со степенью выгорания 50 ГВт • сут/т. При этом за счет большой разности температур сублимации (кипения) обеспечиваются высокие коэффициенты очистки целевых фторидов урана и плутония как от фторидов продуктов деления, так и от фторидов трансплутониевых элементов.

Растворение металлических ТВЭЛов в жидких галогенфторидах

При переработке опытных твэлов энергетических реакторов, в которых используется уран, обогащенный изотопом ^{235}U, задача выделения плутония обычно не стоит, поскольку он образуется в очень незначительных количествах. Основными видами композиций твэлов являются смеси на основе UO_2 в оболочке из циркония, циркалоя, алюминия или нержавеющей стали. Цирконий и алюминий обладают устойчивостью к действию фтороводорода, элементного фтора и галогенфторидов. Поэтому для их растворения разрабатывают процессы с применением фторидных расплавов, например LiF–BeF_2, KF–LiF, NaF–LiF, KF–ZrF_4, NaF–ZrF_4. Для растворения сплавов на основе циркония применяют также расплав KF–ZrF_4–LiF, а для с алюминиевых сплавов – KF–ZrF_4–AlF_3.

На рис. 2 приведена диаграмма растворения в системе KF–ZrF_4–AlF_3. Пунктиром показана область с температурой плавления 600 °C и ниже. Растворение проводят поэтапно, сначала в расплаве KF–ZrF_4 (соответственно 40 и 60 % мол.) при 600 °C до достижения мольного отношения 51 % KF – 34 % ZrF_4 – 15 AlF_3 (точка G). Затем в расплав добавляют фторид калия (линия GH) до достижения соотношения

Таблица 2. Баланс распределения радионуклидов продуктов деления по основным элементам аппаратуры при газофторидном процессе регенерации отработавшего топлива реактора БОР-60 (по отношению к исходному содержанию в топливе), %

Радионуклид	Твердые отходы фторирования	Форконденсатор	Очистительная сорбционная колонка	Колонка цикла сорбции-десорбции	Конденсатор
Ce + Pr	70	0,1	0,1	0,03–0,5	–
Cs	75	0,1	6	0,03–0,5	–
Zr	80	0,1	0,170	–	–
Ru + Rh	40	6		0,03–0,5	–
Nb	10	1	1	0,03–0,5	0,14
Sr	100	–	–	–	–
Ba	100	–	–	–	–
Остальные радионуклиды	–	–	–	10^{-4}–10^{-3}	10^{-4}–10^{-3}

60,6–27,3–12,1 % мол. и вновь проводят растворение керамических твэлов (линия HI). Линия IJ характеризует повторное введение фторида калия, а линия JK – растворение U–Al до образования состава 52,2–17,3–30,5 % мол. При таком проведении процесса на заключительных стадиях растворения твэлов с содержанием урана 5 % можно получить расплав с содержанием урана 0,3 %, который затем профторировать элементным фтором.

Скорость растворения алюминия при 600 °C составляет 0,2–1,3 мм/ч. Для его полного растворения необходимо от 11 до 20 ч. В процессе взаимодействия со фтором остаточная концентрация урана снижается до (1,2–2,0) • 10^{-4} %. Коэффициент очистки урана от циркония при растворении топлива со степенью выгорания ^{235}U от 24 до 31 % и различном времени выдержки изменяется в пределах 10^8–10^9.

Скорость растворения облученного топлива из UO_2 в оболочке из циркалоя в смеси LiF–NaF-ZrF_4 (31–24–45 % мол.) при 650 °C составила 0,2–0,4 мм/ч, что в 2–4 раза больше величины, полученной при растворении сплавов U–Zr в аналогичных условиях.

Фторирование в галогенфторидах считается одним из наиболее перспективных процессов переработки керамического оксидного ОЯТ, что подтверждают проведенные теоретические исследования. Низкая опасность перегрева и воспламенения реагирующей массы за счет особенностей метода также делает его конкурентноспособным, относительно уже существующих технологий.

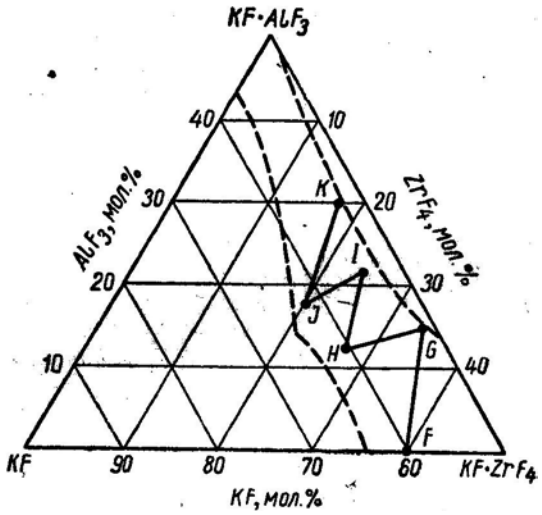


Рис. 2. Диаграмма растворения UF_6 в системе KF–ZrF_4–AlF_3

Литература

1. Громов Б. В. Химическая технология облученного ядерного топлива / Б. В. Громов, В. И. Савельева. – Москва: Энергоатомиздат, 1983.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В 30-км ЗОНЕ СНЯТОЙ С ЭКСПЛУАТАЦИИ ИГНАЛИНСКОЙ АЭС

Й. Мажейка, О. Ефанова, Р. Петрошюс

Центр исследования природы
Вильнюс, Литва, jonas.mazeika@gamtc.lt, olga.jefanova@gamtc.lt, rimantas.petrosius@gamtc.lt

RESULTS OF RADIOECOLOGICAL'S INVESTIGATIONS IN 30-KM ZONE OF THE DECOMMISSIONED IGNALINA NPP

J. Mazeika, O. Jefanova, R. Petrosius

Nature Research Centre
Vilnius, Lithuania, jonas.mazeika@gamtc.lt, olga.jefanova@gamtc.lt, rimantas.petrosius@gamtc.lt

In this paper are presented the data of Cs-137, H-3, C-14 specific activity in plants (moss, blueberry, leaves of rowan, Artemisia) and soil in different distances from the Ignalina NPP in 2008 and 2016–2020. The transfer of accumulated Cs-137 from moss green biomass to soil component and growing of new "radionuclide free" green biomass is not clearly expressed in the vicinity of the INPP, which confirms the arrival of "fresh" radionuclides at the present time. The accumulation of Cs-137, H-3, and C-14 in analyzed terrestrial plants is somewhat higher in cases where growing places are closer to the INPP.

Введение

Игналинская атомная электростанция (ИАЭС) расположена в северо-восточной части Литвы около оз. Дрисвяты (Drūkšiai), которое используется как водоём-охладитель. Первый энергоблок ИАЭС введён в эксплуатацию в 1983 г., второй блок – в 1987 г. Первый блок был выведен из эксплуатации в январе 2005 г., а второй – 31 декабря 2009 г. [1]. Вывод АЭС из эксплуатации – это долгий и трудоёмкий процесс. В настоящее время проект вывода ИАЭС из эксплуатации рассчитан до 2038 г., тем не менее, рядом со зданиями ИАЭС на территории промышленной площадки и за её пределами возводятся новые инженерные сооружения, в том числе комплекс по переработке и хранению радиоактивных отходов, что ещё на более долгий срок актуализирует данный промышленный объект как возможный / потенциальный источник поступления техногенных радионуклидов в окружающую среду.

Кондиционирование жидких радиоактивных отходов происходит за счет их концентрирования, отверждения концентратов, размещения продукта переработки в упаковки (бочки, контейнеры или другие емкости). Кондиционирование твердых радиоактивных отходов – это сжигание, прессование, дезактивация, нанесение защитных покрытий, размещение в упаковки (бочки, контейнеры и т. д.) [2]. В процессе хранения и переработки жидких радиоактивных отходов остаётся возможность поступления техногенных радионуклидов в водные объекты, а при сжигании твердых отходов – в атмосферу, с дальнейшим переносом и осаждением на подстилающую поверхность. Таким образом, остается важной задача оценки способности миграции радионуклидов в инженерных барьерах и окружающей среде.

При безопасной переработке радиоактивных отходов на объектах атомной энергетики ожидаются соответствующие допустимым уровни радиации, не наносящие вреда работникам, населению и окружающей среде. Для возможности реагирования при признаках аварийных ситуаций на территории Евросоюза вокруг потенциально опасных объектов ведётся наблюдение радиационного фона на платформе EURDEP [3]. Оцениваются дозовые нагрузки, составляющие как совокупность природного фона, так и от техногенных радионуклидов в окружающей среде без идентификации по отдельному вкладу.

Как показано во многих исследованиях [4–7], в периоде эксплуатации ИАЭС компоненты наземных экосистем вблизи ИАЭС содержали радионуклиды техногенного происхождения (Cs-137, Co-60, H-3, C-14). Целью данной работы является количественная оценка содержания Cs-137, H-3 и C-14 в некоторых компонентах окружающей среды в непосредственной близости от ИАЭС в ходе её вывода из эксплуатации.

Материалы и методы

Для оценки радиоэкологической ситуации на разных расстояниях от ИАЭС находятся две долговременные площадки отбора растений и почвы (рис. 1). Это полуостров Грикинишкес (площадка 3 с точками I-X) и Тильже (площадка 12). В ходе настоящего исследования на п-ове Грикинишкес отбирался лесной мох и почва в ноябре 2016 г. на 10 точках (рис. 1, справа).

Пробы мха отбирались по принципу конверта с участков 25 × 25 см в нескольких повторениях, на расстоянии не далее, чем 1 м друг от друга для каждой точки. Параллельно подо мхом отбиралась и почва. В 2017 г. также были отобраны образцы чер-

ники (лат. *Vaccinium myrtillus*) и листьев рябины (лат. *Sorbus aucuparia*). Также более точно были разделены слои мха на два подслоя: O leaf – фотосинтезирующая часть мха и примесей подстилки и O ferm – изменившая цвет часть мха с примесями. В слое O ferm происходит ферментация и почвообразовательные процессы. Для сравнения использованы данные по содержанию радионуклидов в лесном мхе и почве в пробах, собранных в тех же местах в августе 2008 г. и более подробно представленных в работах [8, 9]. В 2018 г. в нескольких точках отобраны пробы листьев рябины. Подготовку проб для измерения активности радионуклидов проводили по стандартным радиоэкологическим методикам. Для γ-спектрометрии пробы растений были высушены и сожжены при 450 °C, активность радионуклидов измерялась в остатках сжигания, результаты пересчитаны на сухой вес растений. Пробы почвы измерялись в сухом состоянии. Измерения активности радионуклидов в пробах проводили на γ-спектрометре с HPGe детектором, оснащенном колодцем, в Центре исследования природы.

В 2020 г. были отобраны пробы листьев рябины и полыни обыкновенной (лат. *Artemisia vulgaris*) для измерения содержания трития и углерода-14 (рис. 1). Полынь обыкновенная еще имеет название чернобыльник или чернобыль – от цвета стебля (былинки). 1 точка находится рядом с промливневым каналом, дренирующем промплощадку ИАЭС, 2 точка – рядом с каналом подогретой воды, 3 точка – на п-ове Грикинишкес, 4 точка – Шашкай (бывший населённый пункт), 5 точка – Восилишкес (несколько усадьб), 6 точка – оз. Скрипку (в это озеро поступают стоки после очистных сооружений города энергетиков Висагинаса), 7 точка – в карьере рекультивированного ила, 8 точка – Тумелина (дачные участки жителей города Висагинаса), 9 точка – Висагинас (город энергетиков, население 18 тыс., административный центр), 10 точка – Будиняй (несколько усадьб), 11 точка – Шакяй (несколько усадьб), 12 точка – Тильже (деревня, около 40 постоянных жителей), 13 – не представленная на карте фоновая точка отбора полыни обыкновенной, хутор Андреюнай в 28 км от ИАЭС.

Пробы для измерения H-3 обрабатывались методом вакуумного дистилирования влаги компонентов растений. Бета спектрометрия очищенных водных образцов с добавлением жидкого сцинтилляционного раствора (Ultima Gold) проводилась на Quantulus 1220. Содержание H-3 представлено на изначальный вес частей растений. Содержание C-14 также измерялось посредством жидких сцинтилляторов после синтеза бензола из в пробе содержащегося углерода. Измерения проводились на Tricarb 3170TR/SL. Содержание C-14 представлено на сухой вес растений.

Результаты и их обсуждение

Лесной мох является наиболее подходящим биоиндикатором для репрезентации атмосферного пути поступления Cs-137 из различных источников. Как показали исследования на п-ве Грикинишкес в 2008 г. [9], содержание Cs-137 зависит от экотопа произрастания мха и других условий среды. В Таблице 1 приведены данные по содержанию Cs-137 во мхе и почве в 2008 г.

Точки I-V расположены на левом берегу от канала подогретой воды ИАЭС, точки I-II и VI – ближе к ИАЭС. Считается, что мох отрастает свою фотосинтезирующую часть за 8 лет. Отмирающие части мха постепенно превращаются в почву, а значит должен происходить вертикальный переход аккумулированного биомассой лесного мха Cs-137 в почву, где происходит процесс старения этого радионуклида (распад, но очень мал миграционный потенциал). Как показывают приведённые в таблице данные 2016 г., в пробах мха не наблюдается содержания Cs-137 ниже измеряемого уровня (< mda). Более того, примеси лесной подстилки (сосновые иголки, опавшие листья, веточки, шишки и проч.) также содержат. Наряду с Cs-137 во мхе и в примесях лесной подстилки также обнаружен Co-60. Хотя наблюдавшаяся активность Co-60 мала, а погрешность измерений

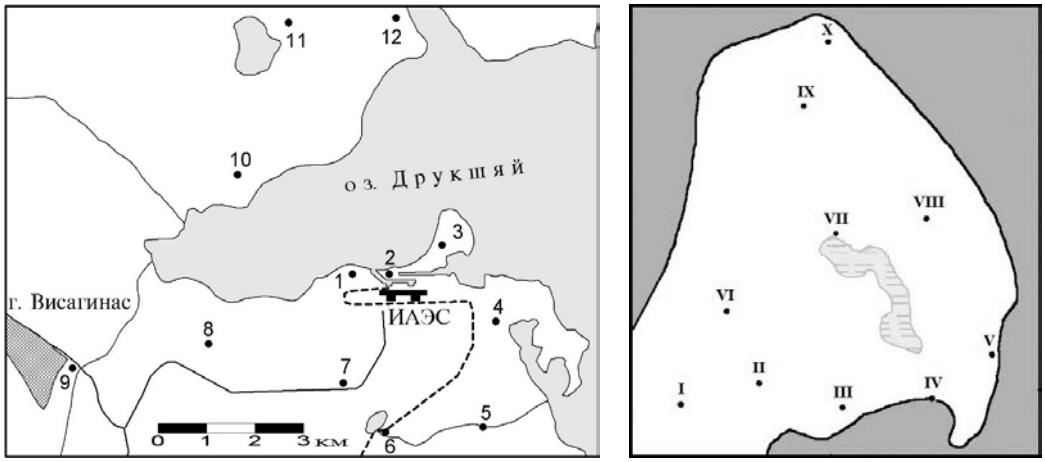


Рис. 1. Места отбора проб в окрестностях ИАЭС

Таблица 1. Содержание Cs-137 (Бк/кг) в лесном мхе и почве на п-ове Грикинишкяй (рис. 1, площадка 3)

№	2008		2016			
	Лесной мох	Почва	Лесная подстилка	Почва	Мох	Примеси
I	2,8 ± 0,6	10 ± 1	6,4 ± 1,0	2,4 ± 0,8	5,4 ± 0,6	5,2 ± 1,2
II	31,2 ± 12,4	49 ± 5	3,1 ± 0,6	1,4 ± 0,6	5,2 ± 0,9	3,7 ± 1,2
III	34,4 ± 2,6	31 ± 3	15,9 ± 1,3	6,8 ± 1,5	22,8 ± 1,1	16,8 ± 1,2
IV	7,6 ± 0,6	6 ± 1	32,0 ± 1,9	13,8 ± 1,3	12,9 ± 0,7	16,3 ± 1,4
V	11,2 ± 1,7	4 ± 0,5	67,3 ± 2,8	13,2 ± 1,6	25,6 ± 1,4	17,2 ± 1,4
VI	120,9 ± 3,5	–	31,6 ± 1,5	8,7 ± 1,5	31,5 ± 1,4	14,7 ± 0,9
VII	31,7 ± 5,0	–	7,7 ± 1,4	9,0 ± 1,9	1,6 ± 0,5	2,5 ± 0,9
VIII	6,0 ± 1,0	–	7,2 ± 1,3	7,4 ± 1,5	2,9 ± 0,8	4,9 ± 1,3
IX	1,5 ± 0,7	–	17,4 ± 2,0	6,6 ± 1,3	5,7 ± 1,7	6,0 ± 0,5
X	8,8 ± 1,6	–	9,9 ± 1,6	11,9 ± 1,7	5,0 ± 1,0	5,4 ± 1,1

«–» данные отсутствуют.

составляла от 30 до 70 %, тем не менее, пики Co-60 на γ-спектрах проб мха и лесной подстилки обнаружены и соответствуют активностям 1,4 ± 0,5, 2,8 ± 1,0 и 1,1 ± 0,7 Бк/кг в точках 1, 6 и 7 во мхе, а так же 1,7 ± 0,7 Бк/кг в примесях лесной подстилки в точке 6. Приведённые данные свидетельствуют о выпадениях Cs-137 содержащих аэрозольных частиц.

Если провести долгосрочную ретроспективу данных по содержанию Cs-137 во мхе и почве на данном полуострове и на противоположном берегу оз. Дрисвяты в точке 12 (Тильже) (рис. 2), то явно видна зависимость интенсивности выпадений Cs-137 от режима работы ИАЭС (при работе двух реакторов, одного реактора и в период вывода АЭС из эксплуатации).

Тем не мение, во всех случаях (кроме 12 точки в 2017 г.) содержание Cs-137 во мхе превышает содержание в почве, что указывает на свежесть выпадений. Следует уточнить, что в точке отбора 12 (Тильже) пробы не были отобраны в 2016 г. А для 2017 г. для обеих точек приведены усреднённые значения содержания Cs-137 подслоев O leaf и O ferm, так как ранее не разделялась фотосинтезирующая часть мха от начавшей разлагаться отмершей, но сохранившей ещё свою форму. Если их разделить, то данные по точке 12 выглядят так: O leaf содержит Cs-137 6,4 ± 0,7 Бк на кг сухой биомассы, O ferm – 32,4 ± 3,2 Бк/кг (причём этот подслой был тонок, всего 2 см) и O humus (почва) – 19,3 ± 2,8 Бк/кг. Содержание Cs-137 в чернике составило 2,1 ± 1,2 Бк/кг, а в листьях рябины – 3,7 ± 0,9 Бк/кг. Листья рябины указывают на наличие переноса Cs-137, тем не менее, подслои мха показывают, что происходит переход Cs-137 из биомассы в неорганическую почву, но это требует более длительного времени, чем отращивание новой фотосинтезирующей части самого лесного мха. Расстояние по прямой (через озеро) от точки 12 до ИАЭС составляет 6 км. Площадка 3 с группой точек удалена от ИАЭС всего на 2 км, поэтому ей свойственно несколько иное распределение Cs-137. Содержание Cs-137 в 2017 г. в точке 3-III в подслое O leaf составляло 24,9 ± 1,2 Бк/кг, O ferm (толщина 8 см) – 34,5 ± 1,3 Бк/кг, а O humus (почва) – 3,6 ± 1,2 Бк/кг. Подслой, в котором происходят почвообразовательные процессы, так же, как и в точке 12, указывает на вертикальный переход Cs-137 из биомассы в почву, однако в разы большее содержание Cs-137 в верхнем слое мха указывает на свежие выпадения аэрозолей с Cs-137 (хотя второй реактор и остановлен в 2009 г.). Данные по содержанию Cs-137 в чернике (33,2 ± 1,7 Бк/кг) подтверждают это предположение, показывая примерно одинаковое содержание Cs-137 в нижнем ярусе леса. Тем не менее, мох и черника – это многолетние растения. Но и «однолетняя» часть биомассы, в данном случае листья лиственного дерева рябины, находящаяся ярусом выше, так же указывает на выпадения Cs-137 в 2017 г. в весенне-летнее время. Содержание Cs-137 в листьях рябины на п-ове Грикинишкес составило 13,6 ± 1,2 Бк/кг, что почти в 4 раза выше, чем содержание Cs-137 в листьях рябины на противоположном берегу оз. Дрисвяты в точке 12.

В Таблице 2 приведены данные по содержанию Cs-137 в листьях рябины, отобранных в 2018 г. Прочерки означают отсутствие проб, значения со знаком меньше – указывают на минимальную детектируемую активность (mda), другие значения достоверны.

В Таблице 2 так же указано расстояние точек отбора проб от ИАЭС. Данные показывают наличие выпадений атмосферных аэрозолей с Cs-137, перенос и осаждение которых зависит от розы ветров, расстояния от ИАЭС до места выпадения и наличия задерживающих барьеров в виде насаждений (тот же лес). В пробах листьев рябины, отобранных в 2020 г., измерялось и содержание трития. Также просматривается зависимость содержания данного радионуклида от расстояния точки отбора до ИАЭС, или другая непосредственная связь, как в случае точки

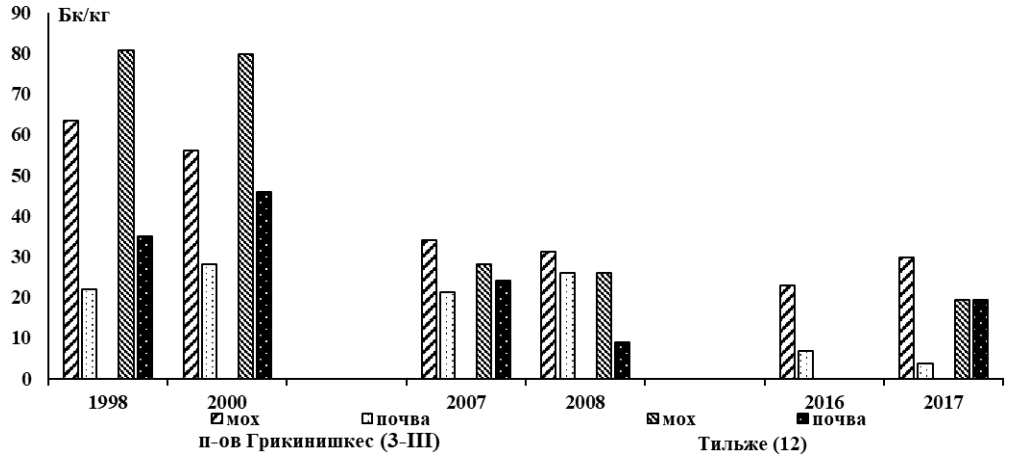


Рис. 2. Содержание Cs-137 во мхе и почве на п-ове Грикинишкес и в Тильже в разные года

Таблица 2. Содержание радионуклидов (Бк/кг) в наземной биомассе растений

Место отбора	Расстояние от ИАЭС	Cs-137 Листья рябины	H-3 Листья рябины	H-3 Полынь обыкновенная	C-14 Полынь обыкновенная
1	0,5 км	–	–	0,95 ± 0,17	146,1 ± 0,8
2	0,8 км	–	1,1 ± 0,2	0,78 ± 0,16	142,0 ± 0,7
3	2 км	4,4 ± 1,0	1,2 ± 0,2	1,08 ± 0,20	134,7 ± 0,7
4	3 км	–	–	0,60 ± 0,16	135,3 ± 0,9
5	4 км	<1,1	0,9 ± 0,2	0,49 ± 0,16	135,8 ± 0,9
6	3 км	–	1,1 ± 0,2	0,64 ± 0,18	137,5 ± 0,8
7	2 км	<1,1	0,9 ± 0,1	0,65 ± 0,16	138,1 ± 0,9
8	3,5 км	1,1 ± 0,9	0,9 ± 0,2	0,82 ± 0,16	133,0 ± 0,7
9	6 км	<1,1	0,7 ± 0,2	0,62 ± 0,19	133,1 ± 0,7
10	3,5 км	1,8 ± 0,9	0,9 ± 0,2	0,65 ± 0,19	133,9 ± 1,2
11	6 км	<1,1	0,6 ± 0,2	0,50 ± 0,17	133,6 ± 1,3
12	6 км	2,1 ± 1,0	0,9 ± 0,2	0,51 ± 0,12	135,6 ± 1,0
13	28 км	–	–	0,37 ± 0,11	133,0 ± 0,9

«–» данные отсутствуют.

6. Эта точка расположена на берегу оз. Скипку, куда поступают стоки после очистных сооружений города энергетиков Висагинаса. В Таблице 2 также приведены данные по содержанию H-3 в листьях полыни обыкновенной. Полынь обыкновенная многолетнее растение, однако, наземная биомасса вырастает и отмирает ежегодно. Отмечается разница между содержанием H-3 в листьях полыни обыкновенной в точках 1-3 (в непосредственной близости от ИАЭС) и в точке 13 (фоновая). Также измерен уровень C-14 в стеблях полыни обыкновенной (Таблица 2). Наибольшее содержание C-14 в полыни обыкновенной установлено на расстоянии меньшем, чем 1 км от ИАЭС.

Заключение

Полученные данные по содержанию Cs-137, H-3 и C-14 во мхе, почве, листьях рябины и полыни обыкновенной показывают индикаторные следы поступления данных радионуклидов в окружающую среду из объектов ИАЭС в период её вывода из эксплуатации. Распространение аэрозолей, содержащих Cs-137, зависит от розы ветров и наличия барьеров на путях переноса. Заметное, но несущественное с точки зрения радиационной безопасности, количество Cs-137 содержащих аэрозолей выпадает в непосредственной близости от ИАЭС. Очищение биомассы верхних компонентов экосистемы путём вертикальной миграции Cs-137 в почву с фиксацией в ней происходит, но незначительные поступления в окружающую среду данного радионуклида продолжаются. Также замечено увеличение содержания

H-3 и C-14 в полыни обыкновенной на расстоянии до 1 км от ИАЭС, что свидетельствует о замечаемом при применении чувствительных методов, но на сей день незначительном поступлении этих радионуклидов из объектов ИАЭС в окружающую среду.

За помощь при проведении полевых работ выражаем благодарность Ю. Д. Баталину, члену Общественного Совета по экологии и энергетике г. Висагинаса.

Литература

1. Игналинская атомная электростанция. 2021. Официальный сайт. URL: http://www.iae.lt (дата обращения: 24.03.2021).
2. Стахив М. Р., Апаркин Ф. М., Хубецов С. Б., Рыжкова В. Н. Переработка и кондиционирование РАО на АЭС для подготовки к окончательной изоляции. 2013. URL: https://www.atomic-energy.ru/technology/40756 (дата обращения: 24.03.2021).
3. EURDEP. The European Radiological Data Exchange Platform. 2021. URL: https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Rad-Data-Exchange и URL: https://www.rsc.lt/radis/ (дата обращения: 24.03.2021).
4. Mikhailov N. D., Kolkovsky V. M., Pavlova I. D. Radiocarbon distribution in northwest Belarus near the Ignalina Nuclear Power Plant. / Radiocarbon, 1999. – № 41 (1). – С. 75–79.
5. Mažeika J. Radionuclides in Geoenvironment of Lithuania. – Vilnius: Institute of Geology, 2002. – 2016 с.
6. Jasiulionis R., Rozkov A. ^{137}Cs activity concentration in the ground-level air in the Ignalina NPP region. / Lithuanian Journal of Physics, 2007. – № 47 (2). – С. 195–202.
7. Gudelis A., Druteikienė R., Lukšienė B., Gvozdaitė R., Nielsen S. P., Hou X., Mažeika J., Petrošius R. Assessing deposition level of ^{55}Fe, ^{60}Co and ^{63}Ni in the Ignalina NPP environment. / Journal of Environmental Radioactivity, 2010. – № 101 (6). – С. 464–467.
8. Jefanova O., Marčiulionienė E. D., Lukšienė B., Gudelis A., Mažeika J. ^{137}Cs sklaidos aplinkoje įvertinimas, naudojant samanas kaip rodiklį. / Visuomenės sveikata, 2012. – № 2. – С. 52–56.
9. Jefanova O., Marciulioniene E. D., Luksiene B. The Spread of ^{137}Cs in Terrestrial Ecosystems of the Ignalina NPP and other Lithuanian Regions. / Research Journal of Chemistry and Environment, 2014. – № 18 (1). – С. 1–6.

АКТИНОИДЫ Th И U ВО ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВАХ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ ЯКУТСКА

В. Н. Макаров

Институт мерзлотоведения СО РАН
Якутск, makarov@mpi.ysn.ru

ACTINOIDS Th AND U IN SUSPENDED MATTERS OF THE SURFACE ATMOSPHERE OF YAKUTSK

V. N. Makarov

Permafrost Institute SB RAS
Yakutsk, makarov@mpi.ysn.ru

The distribution of Th and U actinides in suspended solids (SS) in the near-ground atmosphere of Yakutsk was studied. During 2019–2020 on the territory of the city, a study of the chemical composition of SS was carried out in the summer atmosphere, solid and soluble phases of the snow cover. A uniform decrease in the concentration of Th and U is observed in the soil- SS dust- SS snow system, but in the water phase of snow the U content is an order of magnitude higher than that of Th. Amphiboles, as well as pyroxenes for Th and carbonates for U, are specific minerals for SS that correlate with actinides. The daily intake of actinides from the atmosphere in the city is estimated at 46 for Th and 16 mg/m^2 SS particles with a high content of Th and U.

Введение

Загрязняющие воздух взвешенные вещества (ВВ) – это собирательное понятие, включающее твердые частицы, атмосферные аэрозоли, непосредственно поступающие в воздух, и те частицы, которые образуются в процессе превращения газов. Установлена серьезная угроза здоровью людей при их воздействии [3]. Размер частиц в воздухе колеблется от 0,01 микрометров (мкм) до 100 мкм.

Уровень загрязнения ВВ является одним из важнейших показателей качества воздуха, которым дышат люди. Взвешенные вещества – недифференцированная по составу пыль (аэрозоль), содержащаяся в воздухе населенных пунктов; показатель вредности – резорбтивное действие, класс опасности – 3.

Материалы и методы

На территории города было проведено геохимическое изучение ВВ в летней и зимней (растворимой и твердой фазы снежного покрова) приземной атмосфере.

Для исследования ВВ летней атмосферы на территории города было установлено 10 пылесборников. Сбор пыли происходил в период с 17 июля по 15 октября 2019 г. Использовались и данные круглогодичного аэрогеохимического мониторинга на стационаре ИМЗ СО РАН (Туймаада). Для получения сведений о зимней атмосфере в марте 2020 г. на территории города было отобрано 80 проб снега. Количество и химический состав ВВ в зимней атмосфере определены при изучении растворимой и твердой фаз снежного покрова.

Аналитическая обработка геохимических проб проведена в лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны Института мерзлотоведения СО РАН (аналитики Л. Ю. Бойцова, Е. С. Петрова, О. В. Шепелева) и в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН. Содержание Th и U определялось масс-спектральным (X-7, Thermo Elemental, США) методом анализа.

Все анализы проб снега были выполнены по аттестованным методикам с использованием стандартных образцов сравнения в аккредитованных лабораториях, а также с процедурами внутреннего и внешнего аналитического контроля.

Описание района

Город Якутск располагается в среднем течении р. Лена, в широкой долине Туймаада и протягивается вдоль левого берега реки на 20 км. Якутск является крупнейшим и старейшим городом, расположенном в сплошной криолитозоне. По величине он является третьим городом в Дальневосточном федеральном округе после Владивостока и Хабаровска. Город интенсивно развивается, за последние десять лет численность населения возросла со 195 тыс. человек в 2000 г. до 323 тыс. человек в 2020 г.

Планировочная структура города радиально-кольцевая. Частая сетка улиц образует значительное количество небольших по площади кварталов (от 2 до 8 га). Проезжая часть улиц в основном приподнята. Характер застройки не ровный: на окраинах города – это преимущественно одно- и двухэтажные строения, в центральной части города – капитальная застройка каменными зданиями (от 4–5 до 9–16 этажей).

По классификации климатов А. А. Григорьева и М. И. Будыко [4] Якутск находится в зоне действия климата недостаточно влажного (индекс сухости от 1,0 до 2,0), умеренно теплого (в летний период), с суровой малоснежной зимой.

Преобладающими, в основные сезоны, являются континентальный воздух умеренных широт и арктический воздух. В районе города это ветра северного и северо-западного направления. Отличительной чертой ветрового режима является большая повторяемость штилей, особенно в декабре-феврале. Средняя скорость ветра в этот период составляет 0,8 м/с, при среднегодовых значениях – 2,4 м/с.

Среднегодовая температура воздуха за период непрерывных метеонаблюдений (1883–2020 гг.) варьирует в пределах –7,2 до –12,1 °С, среднегодовое количество осадков – 235 мм.

Мощность многолетнемерзлых пород на территории города 250–450 м, сезонноталого слоя (СТС) – 1,5–2,0 м

В городе насчитывается порядка 160 крупных предприятий, имеющих стационарные источники выбросов в атмосферу, и выбрасывающих ежегодно 11700 тонн загрязняющих веществ [2]. Стационарные источники выбросов преимущественно объекты теплоэнергетики: купные электростанции и многочисленные котельные, в основном работающие на газовом топливе, и предприятия стройиндустрии.

По данным ГИБДД Якутска, в 2018 г. в столице и пригородах зарегистрировано порядка 119 тысяч единиц автотранспорта, выбрасывающих в атмосферу около 34 тыс. т загрязнителей. Уровень загрязнения атмосферного воздуха г. Якутска оценивается как повышенный.

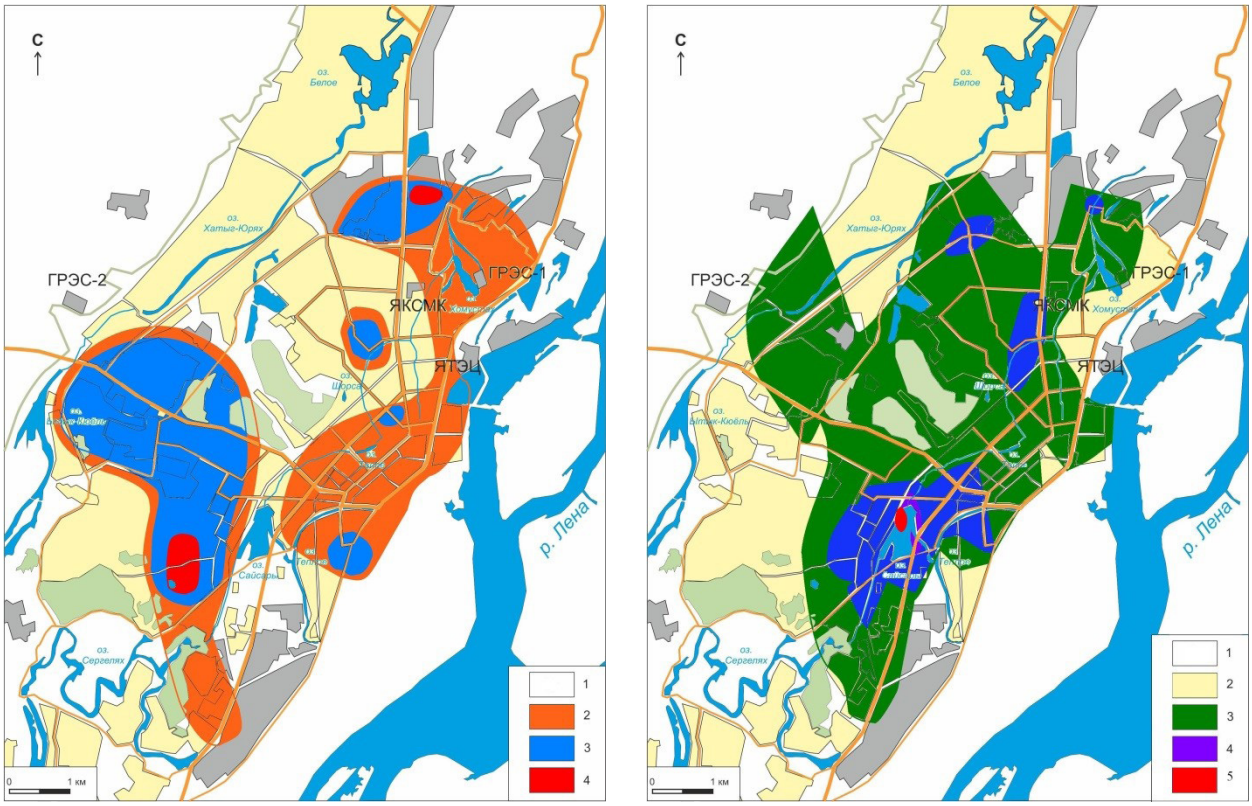
Геологическое строение района определяется его положением в зоне стыка двух крупных структур Сибирской платформы: Алданской антеклизы и Вилюйской синеклизы. В геохимическом отношении территория относится к Вилюйской лито-сидерофильной области с кларковым уровнем накопления V, Ti, Mn, P, Sb, Sn, Li, Nb, U и Лено-Алданской халькофильной зоне с накоплением Se, Pb, Ag, Bi, Au. Геохимический состав зоны гипергенеза, которая может быть источником вещества привносимого в атмосферу приведен в таблице 1.

Результаты и обсуждение

В приземной атмосфере Якутска формируются техногенные геохимические аномалии тяжелых металлов, редких и радиоактивных элементов. Изученные актиноиды формируют обширные малоконтрастные ореолы в центральной части города – U или локальные точечные аномалии на его территории – Th (рис. 1).

Таблица 1. Коэффициент концентрации элементов в геологических составляющих зоны гипергенеза [5, 6]

Компоненты зоны гипергенеза	Коэффициент концентрации (относительно кларка земной коры – КЗК [1])					n
	0,7–1,0	1,0–1,5	1,5–2,0	> 2,0	> 5,0	
Аллювий, Q	P, V, Cr, Ni, Mn, Y Zn, Cu, Ca, Ge, Nb, La, Yb, Sc, Ti, **U**, **Th**	Li, Be, Sn, B Mo, Au	Ag, Pb, W	Co	–	124
Почвы города	Li, P, V, Cr, Ni, Y Cu, Ca, Ge, Nb, Sn, La	Ti, Mn, Zn, Y, Mo, Tl, **U**, **Th**	W	B, Ag, Pb, Co	Hg	1769



Th: 1 – 0,008–0,010; 2 – 0,01–0,015; 3 – 0,015–0,020; 4 – > 0,02

U: 1 – 0,02–0,05; 2 – 0,05–0,10; 3 – 0,10–0,20; 4 – 0,20–0,50; 5 – > 0,50

Рис. 1. Содержание актиноидов в растворимой фазе снежного покрова, мкг/л

По данным анализа материала, собранного пылесборниками, ВВ в приземной летней атмосфере полидисперсны и представляют собой совокупность твердых частиц разного размера. Дисперсный состав ВВ в основном относится к собственно пыли, фракция $PM_{10–100}$ – около 70 % (PM – аббревиатура «particulate matter», цифра показывает содержание всех частиц диаметром 10–100 мкм). Для Th и U наблюдается преимущественное накопление в пылеватых фракциях, в комплексе с группой сидерофильных элементов – Ti, Mn, Co, Ni, Zn, Ga, Sr, Zr, Sn, La, W, поступающих в атмосферу в основном с минералами группы железа. Как в более крупной, так и в дисперсной фракциях ВВ концентрация актиноидов снижается, но не синхронно.

Минералогический состав основной массы «летних» ВВ ($PM_{10–100}$) в атмосфере города представлен в легкой фракции: кварцем и карбонатами (по 36 %) и полевым шпатом (24 %); в тяжелой: преимущественно амфиболами (49 %), эпидотом и пироксенами (10–11 %), ильменитом и гранатами (около 7 %). Более дисперсная «зимняя» пыль (PM_{10}) сложена преимущественно карбонатами (около 70 %), углистыми соединениями (15 %), включениями кварца и полевого шпата 10 %) и ожелезненного растительного детрита (5 %). Специфичными минеральными фазами ВВ коррелирующими с актиноидами, осевшими на почвенный покров в зоне техногенного воздействия, являются: для Th пироксены и амфиболы, для U карбонаты и амфиболы.

Среднее содержание актиноидов в компонентах атмосферы и литосферы в районе Якутска представлено в табл. 2.

Наблюдается равномерное понижение концентрации Th и U в системе почвы- ВВ летние – ВВ зим-

Таблица 2. Среднее содержание актиноидов в компонентах окружающей среды, мг/кг

Природная среда	Th	U	Источники
Атмосфера			
Аэрозоли зима (снег)	$0{,}6 \cdot 10^{-5}$	$4{,}4 \cdot 10^{-5}$	Автор
ВВ зима (снег)	1,45	0,52	
ВВ лето	5,5	1,54	
Литосфера			
Литосфера	13,0	2,5	[1]
Пески, песчаники	6,7	2,0	[3]
Почво-грунты, Центральная Якутия	7,3	1,72	[7]
Почво-грунты, Туймаада	10,6	2,4	

ние – аэрозоли и газы. В почвах, летних и зимних ВВ преобладает Th, в водной фазе снега содержание U становится на порядок выше, чем Th.

Величина коэффициента аэрозольной аккумуляции показывает, что при формировании аэрозолей концентрация актиноидов в ВВ понижается на один математический порядок по сравнению с аллювиальными почвами Центральной Якутии. Как U, так и Th, являются элементами с отрицательной интенсивностью аэрозольного обогащения. Пониженная концентрация Th и U в континентальных аэрозолях района обусловлена составом исходного материала – преимущественно полимиктовых песков, поступающих в тропосферу в качестве аэрозольных частиц.

Основная масса актиноидов – около 90 % выпадает из атмосферы в теплый период года. Ежесуточное поступление актиноидов из атмосферы в это время составляет в среднем Th = 0,233, U = 0,084 (Th/U = 2,8) и достигает максимальных значений, соответственно, 0,934 и 0,274 мг/м^2 • сутки.

На зимние твердые впадения ВВ (преимущественно фракция PM_{10}) приходится около 10 % от общей массы поступления актиноидов из атмосферы на территорию города. Ежесуточное поступление актиноидов из атмосферы в холодный период на порядок ниже, чем летом для Th и на два порядка для U (Th/U = 3,5) и составляет: Th = 0,028, U = 0,008 мг/м^2 • сутки.

С аэрозольными и газовыми выпадениями – растворимая фаза снега из зимней атмосферы поступают минимальные объёмы актиноидов: в среднем $Th = 0{,}9 \cdot 10^{-7}$ и $U = 8 \cdot 10^{-7}$ мг/м^2 • сутки (табл. 3), при отношении Th/U = 0,11.

Общий объем атмосферного поступления актиноидов на территорию города оценивается цифрой около 63 мг/м^2 • год, 2/3 которой составляет Th. На участках контрастных аномалий эта величина может возрастать более чем в три раза, достигая 217 мг/м^2 • год, основная часть которой также представлена Th.

Суммарное выпадение актиноидов на территорию города составляет $n \cdot 10^{-3}$ % от общего объема загрязняющих веществ поступающих из атмосферы.

В почвы и грунты сезонноталого слоя (СТС) бóльшая часть актиноидов поступает из атмосферы. Преимущественное поступление Th и U с пылевыми фракциями ВВ ограничивает их миграционную способность в основном поверхностью почв, в то время как присутствие этих металлов в растворимой фазе снежного покрова позволяет им, при таянии снега, проникать в более глубокие горизонты СТС, концентрируясь в грунтовых водах. Наблюдается зависимость концентрации актиноидов в снежном покрове и надмерзлотных водах СТС (рис. 2).

Повышает подвижность U в грунта СТС и надмерзлотных водах рост щелочных значений pH (7,2–7,7) и определенная открытость грунтов, окислительно восстановительный потенциал которых равен в среднем 419 мВ.

Заключение

На территории города было проведено геохимическое изучение ВВ в летней и зимней (растворимой и твердой фазы снежного покрова) приземной атмосфере.

Установлено, что в приземной атмосфере Якутска формируются техногенные геохимические аномалии тяжелых металлов, редких и радиоактивных элементов. Изученные актиноиды формируют обширные малоконтрастные ореолы в центральной части города (U) и локальные точечные аномалии на его территории (Th).

ВВ в приземной летней атмосфере полидисперсны и представляют собой совокупность твердых частиц разного размера. В летней атмосфере Th и U концентрируются преимущественное в пылевой фракции ВВ (PM_{10-100}), в комплексе с группой сидерофильных элементов. Зимние ВВ более дисперсны и в основном представлены фракцией PM_{10}.

Специфичными минеральными фазами ВВ коррелирующими с актиноидами, осевшими на почвенный покров в зоне техногенного воздействия, являются: для Th пироксены и амфиболы, для U карбонаты и амфиболы.

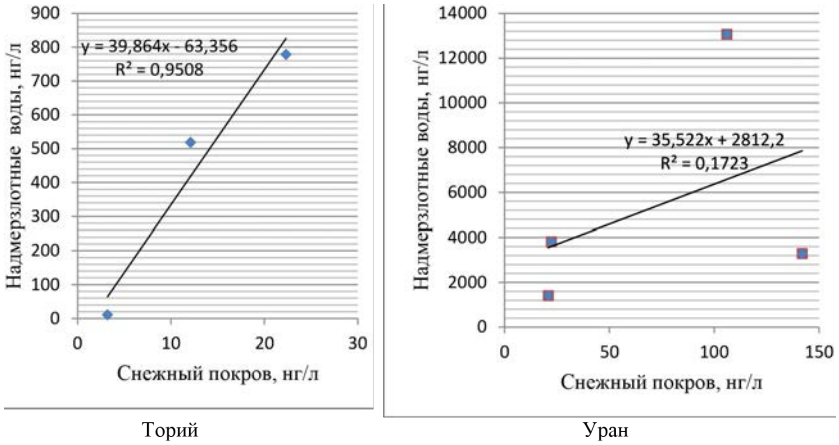
Концентрация Th и U равномерно понижается в системе: почвы – ВВ летние – ВВ зимние (снег) – аэрозоли и газы (снег). В почвах, летних и зимних ВВ преобладает Th, в аэрозольно-газовой составляющей, благодаря высокой миграционной способности, содержание U становится на порядок выше, чем Th.

Основная масса актиноидов – около 90 % выпадает из атмосферы в теплый период. На зимние

Таблица 3. Ежесуточное поступление актиноидов из атмосферы

Актиноиды	Статистические параметры	Летний период. Взвешенные вещества		Зимний период. Снег				Сумма выпадений
				Пыль		Аэрозоли		
		мг/м² • сут	%	мг/м² • сут	%	мг/м² • сут	%	мг/м² • год
Th	$C_{арифм}$	0,233	89	0,028	11	$0,9 \cdot 10^{-7}$	$n \cdot 10^{-7}$	46,5
	$C_{макс}$	0,934	95	0,053	5	$0,3 \cdot 10^{-6}$	$n \cdot 10^{-6}$	169
U	$C_{арифм}$	0,084	91	0,008	9	$0,8 \cdot 10^{-6}$	$n \cdot 10^{-6}$	16,4
	$C_{макс}$	0,274	97	0,009	3	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$n \cdot 10^{-5}$	48

Содержание: $C_{макс}$ – максимальное, $C_{арифм.}$ – среднее арифметическое.



Торий Уран

Рис. 2. Концентрация актиноидов в надмерзлотных водах и снежном покрове

твердые впадения ВВ приходится около 10 % от общей массы поступления актиноидов из атмосферы на территорию города. С аэрозольными и газовыми выпадениями из зимней атмосферы поступают минимальные объёмы Th и U.

Общий объем атмосферного поступления актиноидов на территорию города составляет около 63 мг/м² • год, 2/3 которого это Th. На участках контрастных аномалий эта величина может возрастать до более чем 200 мг/м² • год, основная часть которой также представлена Th.

Основными источниками поступления актинидов в приземную атмосферу Якутска являются пыление с поверхности почв и выбросы автотранспорта. В меньшей степени – выбросы объектов энергетики.

Поступление Th и U из атмосферы в миграционных формах (в растворимой фазе снежного покрова) позволяет им при таянии снега, проникать в более глубокие горизонты СТС, концентрируясь в надмерзлотных водах.

Уровень загрязнения зимней атмосферы практически на всей территории города по суммарному показателю загрязнения снежного покрова оценивается как низкий и умеренно опасный в зонах интенсивного движения транспорта и вблизи объектов энергетики.

Литература

1. Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах / Виноградов А. П. // Геохимия, 1962. – № 7. – С. 555–571.
2. Государственный доклад об экологической ситуации в Республике Саха (Якутия) в 2019 г.: https://minpriroda.sakha.gov.ru (дата обращения: 15.02.2021).
3. Григорьев Н. А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры / Н.А. Григорьев. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 382 с.
4. Григорьев А. А., Будыко М. И. Классификация климатов СССР / А. А. Григорьев, М. И. Будыко // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1959. – № 3. – С. 3–19.
5. Макаров В. Н. Экогеохимия окружающей среды города, расположенного в криолитозоне (на примере Якутска) / В. Н. Макаров // Региональная экология, 2016. – № 4 (46). – С. 7–21.
6. Подъячев Б. П. Геохимические аномалии благородных металлов в осадочных отложениях

Якутского поднятия / Б. П. Подъячев // Система коренной источник-россыпь. – Якутск, 2009. – С. 166–173.
7. Chevychelov A. P. The Contents and Distributions of Natural Radionuclides ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K in Permafrost Soils of Central Yakutia / A. P. Chevychelov, P. I. Sobakin // Journal of Siberian Federal University. Biology, 2020. – № 13 (1). – С. 109–123.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИИ, МЕТАЛЛОГЕНИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ТОНОДСКОГО ПОДНЯТИЯ (СЕВЕРНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Л. Б. Макарьев, В. А. Калина

Всероссийский научно-исследовательский институт им. Карпинского (ВСЕГЕИ) Санкт-Петербург, Россия, Leonid_Makariev@vsegei.ru, Viktoriya_Kalina@vsegei.ru

FEATURES OF GEOLOGY, METALLOGENY AND PROSPECTS OF TONODSKY ELEVATION (NORTHERN TRANSBAIKALIA)

L. B. Makariev, V. A. Kalina

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI) Saint-Petersburg, Russia, Leonid_Makariev@vsegei.ru, Viktoriya_Kalina@vsegei.ru

The article provides the available and obtained new geological, petrogeochemical, radiological, and mineragenic data, the features of the geological structure, geodynamics, and metallogeny of Tonodsky elevation (Northern Transbaikalia). The leading ones (gold, uranium) and minor (tin, tungsten) ore minerals and epochs of ore formation are characterized. The main ore and potentially ore nodes of the Tonodsky ore district were identified, their prospects were evaluated, and recommendations for further exploration were developed.

Введение. Тонодское поднятие входит в состав Байкало-Патомской краевой системы Саяно-Байкальской складчатой области и представляет собой горст-антиклинальный выступ раннепротерозойского (карельского) гранит-метаморфического основания среди рифейских параплитных комплексов Прибайкальско-Патомского перикратонного прогиба.

Основной металлогенический потенциал Тонодского поднятия (рудного района) формируют месторождения и рудопроявления золота, урана, олова и вольфрама, а открытые на этой территории месторождений золота и урана представляют промышленный интерес для всего Северного Забайкалья.

Особенности геологического строения и развития. В геологическом строении Тонодского поднятия принимают участие раннепротерозойские образования, перекрывающиеся с выраженным региональным структурно-стратиграфическим несогласием рифейскими отложениями. Тектоническими ограничениями Тонодского поднятия служат региональные продольные северо-восточные разломы взбросонадвигового типа. Такими же разломами более высокого порядка и сопряженными с ними разрывными нарушениями ортогональной ориентировки осложнена внутренняя структура поднятия. В соответствии с современными представлениями раннепротерозойские образования кристаллического основания (фундамента) разделяются на раннекарельские и позднекарельские, отличающиеся геодинамическими обстановками формирования.

Раннекарельские образования формировались в условиях активной континентальной окраины в обстановках вулканических (гранит-зеленокаменных) поясов и краевых прогибов. Фрагменты регионального гранит-зеленокаменного пояса, протягивающегося вдоль юго-восточной окраины Сибирской платформы от Прибайкалья (Акиткана) на расстояние до 1000 км, представлены в Туюканском выступе (рис. 1) образованиями большеминьско-кутимской вулкано-плутонической ассоциации, а фрагменты раннепротерозойского краевого прогиба миогеосинклинального типа повсеместно сохранились на Тонодском поднятии в виде отложений кевактинской серии. Предполагается, что общая протяженность краевого прогиба значительно превышала 200 км, а его заложение во времени синхронно с завершением формирования зеленокаменных образований Туюканского выступа. Геодинамика и последовательность образования этих структур в целом напоминают обстановку формирования вулканических дуг и задуговых бассейнов (прогибов) активных окраин аккреционно-коллизионных областей.

Большеминьско-кутимская вулкано-плутоническая ассоциация объединяет большеминьский вулканический комплекс (включающий большеминьскую толщу и субвулканические образования) и кутимский

плутонический комплекс, впервые выделенных в этом статусе В. В. Бульдыгеровым и Н. А. Срывцевым (1982 г.) в Акитканской структурно-формационной зоне. Туюканский выступ нацело сложен осадочно-вулканогенными породами большеминьской толщи, интрудированных в центральной части субвулканическими силлами габброидов и гранитами кутимского комплекса (Богыктахский массив). По материалам ГДП-200/2 листа O-49-XII (Пай В.М., Макарьев Л. Б. и др., 2019 г.) в ФГБУ «ВСЕГЕИ» впервые получены конкордантные возраста базальтов большеминьской толщи и гранитов кутимского комплекса, составившие 2042 ± 18 млн. лет и 2045 ± 22–2023 ± 14 млн. лет соответственно. Пространственное сонахождение, одновозрастность и одинаковые геодинамические условия формирования в совокупности доказывают комагматичность образований большеминьского и кутимского комплексов, и правомерность их включения в единую раннекарельскую вулкано-плутоническую ассоциацию [2].

Кевактинская серия широко распространена на Тонодском поднятии, где тяготеет к его краевым частям и традиционно расчленяется на свиты: нижнюю албазинскую (метапесчаниковую) и верхнюю михайловскую (углеродистую алевросланцевую с метапесчаниками). Геохимически специализированными являются углеродистые метаалевролиты и филлитовидные сланцы михайловской с постоянно повышенными содержаниями Zn, Pb, Ag, Au, Rh, Pd, Pt, Bi, Se, As, Mo, U при аномальных концентрациях Au и платиноидов (в основном Pd). Кевактинская серия является рудовмещающей в пределах всего Тонодского поднятия (проявления урана, олова, вольфрама и др.), а михайловская свита – определившейся продуктивной на золото (месторождение Чертово Корыто и более мелкие объекты). Полные разрезы отложений кевактинской серии, включая продуктивную михайловскую свиту, представлены в Михайловской, Гаричинской и Котлинской брахисинклиналях (рис. 1).

Позднекарельские образования характеризуют коллизионную обстановку развития анализируемой территории и выделяются в составах чуйско-нечерского и чайского интрузивных комплексов.

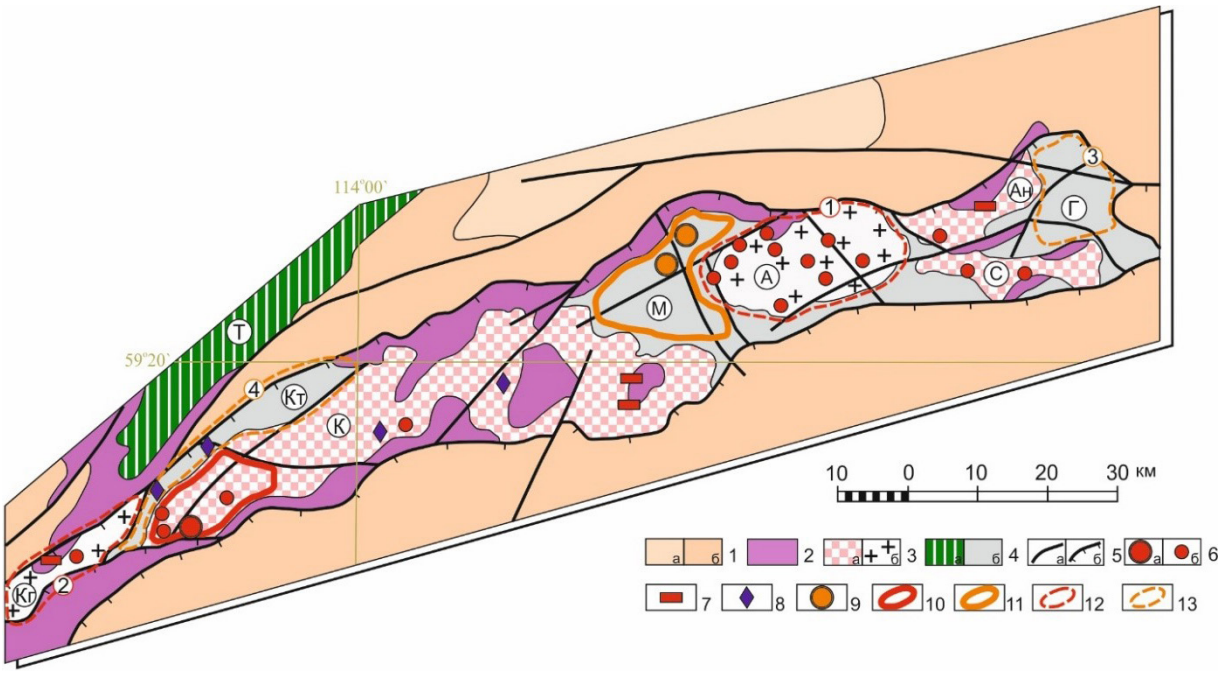


Рис. 1. Схема геологического строения и металлогенического районирования Тонодского поднятия

1–2 – отложения рифейского чехла: 1 – верхнерифейские (дальнетайгинский и жуинский горизонты) (а) и среднерифейские (балаганахский горизонт) (б); 2 – нижнерифейские (пурпольская и медвежевская свиты); 3–4 – раннепротерозойские образования фундамента: 3 – позднекарельские гранитоиды чуйско-нечерского комплекса, в том числе порфировидные граниты (а) и лейкограниты (б); 4 – раннекарельские зеленокаменные (большеминьский вулканический комплекс) (а) и углеродистые терригенные (кевактинская серия) (б); 5 – разрывные нарушения (а), в том числе взбросо-надвиги (б); 6–7 – урановорудные объекты: 6 – Туюканское месторождение (а) и рудопроявления (б) урана в породах фундамента; 7 – рудопроявления урана в нижнерифейских отложениях; 8 – рудопроявления олова и вольфрама; 9 – месторождения золота; 10–11 – рудные узлы: 10 – Туюканский урановорудный, 11 – Кевактинский золоторудный, 12 – потенциальные урановорудные узлы: 1 – Амандракский, 2 – Когальский; 13 – потенциальные золоторудные узлы: 3 – Станнахский, 4 – Большетуюканский.

Главные морфоструктурные элементы Тонодского поднятия (буквы в кружках): М – Михайловская, Г – Гаричинская, Кт – Котлинская брахисинклинали; А – Амандракский, К – Кевактинский, Кг – Когальский, Ан – Аянахский, С – Семикачинский гранитоидные массивы; Т – Туюканский выступ.

Чуйско-нечерский комплекс гранитоидный занимает большую часть площади Тонодского поднятия. Наиболее крупными являются Кевактинский батолитовый и Амандракский куполовидный массивы. Первый из них сложен порфировидными и мелкозернистыми (в апикальных частях) гранитами с реликтами более ранних гранодиоритов. В составе однофазного Амандракского массива преобладают лейкократовые граниты, своеобразие которых заключается в наиболее интенсивно проявленных альбит-грейзеновых изменениях и выраженной существенно урановой (калий-урановой) радиогеохимической специализации относительно торий-урановой в гранитах Кевактинского массива. Подобный Амандракскому Когальский массив лейкогранитов (рис. 1) выделяется в крайней западной части Тонодского поднятия (Иванов А. И. и др., 1984 г.; Пай В. М., Макарьев Л. Б. и др., 2019 г.). Петрогеохимическое изучение гранитоидов чуйско-нечерского комплекса (гранитов Кевактинского массива и лейкогранитов Амандракского и Когальского массивов) показало, что они являются типичными представителями коллизионных умереннощелочных гранитов S-типа, обогащенных Rb, Cs, Li, легкими REE (наряду с U, Mo, Sn, W и др.) и принадлежащих известково-щелочной серии калиевого и калиево-натриевого типов. Считается, что граниты чуйско-нечерского комплекса участвуют в строении трансрегионального Южно-Сибирского коллизионного пояса, протягивающегося вдоль южного обрамления Сибирской платформы (Ларин А. М. и др., 2006 г.). Полученный в ФГБУ «ВСЕГЕИ» конкордантный возраст порфировидных и мелкозернистых гранитов Кевактинского массива (включая Туюканское месторождение) составил 1847 ± 6, 1847 ± 6 и 1846 ± 9 млн. лет. Ранее аналогичный возраст в 1846 ± 8 млн. лет был определен в ИГГД РАН (Ларин А.М. и др., 2006 г.) для гранитов этого массива в районе оловорудного проявления Серебристое. Впервые в ФГБУ «ВСЕГЕИ» продатированы лейкограниты чуйско-нечерского комплекса, характеризующиеся близким возрастом в 1843 ± 18 млн. лет. Эти данные позволяют заключить, что время формирования чуйско-нечерского комплекса ограничивается временным интервалом 1850–1840 млн. лет. Подобная рудоносность проявлена на территории Тонодского поднятия формированием в гранитах и вмещающих породах олово-вольфрамового и уранового оруденения.

Чайский комплекс габбродолеритовый пользуется региональным распространением на Тонодском и других поднятиях Байкало-Патомской краевой системы (включая петротипическую местность в Акитсканской СФЗ), где является преобладающим среди дайковых комплексов основного состава. На Тонодском поднятии комплекс представлен роями даек, реже малыми интрузиями метаморфизованных долеритов, габбродолеритов, реже габбродиоритов, монцогаббро и монцонитов, прорывающих граниты чуйско-нечерского комплекса и отложения кевактинской серии. Протяженность отдельных даек достигает 3,5 км и более при мощности от 5–10 до 40 м. Дайки и малые интрузии чайского комплекса отчетливо перекрываются нижнерифейскими отложениями. Позднекарельский возраст данного комплекса обосновывается современными датировками чайских габбродолеритов в петротипической местности U–Pb методом по бадделеиту – 1751,8 ± 3,2 млн. лет (Гладкочуб Д. П. и др., 2010 г.). Практически такой же возраст, с учетом погрешности, впервые получен в ФГБУ «ВСЕГЕИ» U–Pb методом по цирконам для даек чайского комплекса на Тонодском поднятии – 1787 ± 29 млн. лет [7]. Чайские габброиды, наряду с дифференцированным составом, отличаются повышенными относительно породных кларков содержаниями редких, редкоземельных элементов и U. Формирование трещинных даек и дайковых роев основных пород чайского комплекса фиксирует региональные процессы растяжения земной коры, проявившиеся на постколлизионном этапе в конце позднего карелия. В это время анализируемая территория представляла собой консолидированное складчатое основание с тенденцией перехода от активного к пассивному состоянию.

Рифейский чехол был сформирован в течение байкальского цикла в обстановках пассивной континентальной окраины. В строении Тонодского поднятия непосредственное участие принимают только нижнерифейские отложения пурпольской и нижне-среднерифейские медвежевской свит, слагающие обрамление поднятия и сохранившиеся в виде останцов в его центральных частях (рис. 1).

Пурпольская свита высокоглиноземисто-кварцевых отложений формации переотложенных кор выветривания знаменует этап эпиконтинентального пенеплена и фиксирует проявленное в ее основании региональное структурно-стратиграфическое несогласие с реликтами остаточной коры выветривания. Отложения пурпольской свиты накапливались в остаточных впадинах предрифейского пенеплена и размывались на наиболее приподнятых участках. Развитые в составе свиты сланцы (с кианитом, хлоритоидом, пирофиллитом) представляют собой непромышленные объекты высокоглиноземистого сырья, а практически повсеместно металлоносные базальные кварцевые конгломераты и гравелиты содержат палеороссыпные концентрации циркона, редкоземельных минералов (с Th и U), ильменита, реже золота.

Медвежевская свита в утвержденных легендах рассматривается в составе медвежевского вулканогенно-осадочного комплекса, включающего субвулканические образования и сформированного на этапе эпиконтинентального рифтогенеза. Вулканогенно-осадочные отложения медвежевской свиты выполняют трогообразные структуры в обрамлении Тонодского поднятия и Туюканского выступа, несо-

гласно залегают на породах пурпольской свиты или непосредственно на карельских гранит-метаморфических образованиях. Свита железоносна в предполагаемых промышленных масштабах и характеризуется развитием пластовых залежей, горизонтов гематит-магнетитовых песчаников и кварцитов. Субвулканические образования медвежевского комплекса представлены дайками, силлами долеритов и габбродолеритов, распространенными преимущественно вдоль северо-западного тектонического обрамления Тонодского поднятия (Тонодский региональный разлом) среди отложений медвежевской и подстилающей пурпольской свит. Возраст даек долеритов и габбродолеритов медвежевского комплекса обосновывается прорыванием отложений пурпольской и медвежевской свит и их полным отсутствием в перекрывающих среднерифейских отложениях балаганахского горизонта. Корректные оценки изотопного возраста в настоящее время отсутствуют.

Важно отметить, что охарактеризованные нижнерифейские отложения пурпольской и медвежевской свит и раннекарельские образования Туюканского выступа и Тонодского поднятия не отличимы по степени метаморфического преобразования и регионально метаморфизированы в условиях биотит-хлорит-мусковитовой субфации зеленосланцевой фации [3]. Последующее осадконакопление в перикратонном обрамлении Тонодского поднятия в течение среднего (терригенные отложения балаганахского горизонта) и верхнего рифея (терригенно-карбонатные отложения дальнетайгинского и жуинского горизонтов) происходило в обстановках континентального склона и шельфа пассивной континентальной окраины. Основной магматизм этого времени, как это считалось ранее [1], на Тонодском поднятии не известен.

Металлогения Тонодского поднятия. Ведущими полезными ископаемыми на Тонодском поднятии являются золото и уран, второстепенными – олово и вольфрам. Основными эпохами рудообразования и рудогенерации рассматриваются карельская, среднерифейская (ранне-среднерифейская), каледонская и герцинская. Карельская и ранне-среднерифейская металлогенические эпохи проявились на соответствующих этапах геологического развития Тонодского поднятия (коллизионном и рифтогенном), а каледонская и герцинская эпохи являются отраженными в связи со становлением за пределами анализируемой территории гигантского палеозойского Ангаро-Витимского гранитоидного ареал-плутона. Главенствующей на Тонодском поднятии является карельская минерагеническая эпоха, в течение которой в коллизионной обстановке формируется основная масса уранового, олово-вольфрамового оруденения, обнаруживающего парагенетическую (простанственно-временную) связь с гранитообразованием чуйско-нечерского времени. С этой же эпохой связываются ранние концентрации золота в известных золоторудных объектах среди углеродистых сланцев. Наиболее масштабное урановое и золотое оруденение изучавшихся месторождений (Туюканское, Чертово Корыто) является полихронным [7].

В границах Тонодского поднятия традиционно выделяется Тонодский рудный район, а в его составе определившиеся рудные и потенциальные рудные узлы.

Золото в промышленных масштабах выявлено в пределах Кевактинского золоторудно-россыпного узла и ожидается в Станнахском и Большетуюканском узлах.

Кевактинский золоторудно-россыпной узел охватывает площадь Михайловской брахисинклинали, расположенной в экзоконтактовых зонах Кевактинского и Амандакского массивов (рис. 1). В Кевактинском узле разведаны крупное месторождение Чертово-Корыто, малое месторождение Желтуктинское и ряд рудопроявлений и проявлений золота золото-сульфидно-кварцевой формации в углеродистых сланцах [4]. Эти объекты локализованы в пределах пяти рудных полей: Артемьевском, Желтуктинском золоторудных, Иллигирском, Медвежьем и Верхне-Кевактинском потенциальных золоторудных. Наиболее важным является Артемьевское золоторудное поле с месторождением Чертово-Корыто, которое вмещается углеродистыми сланцами продуктивной михайловской свиты. По имеющимся данным (Баженов М. М. и др., 1981) формирование этого месторождения происходило в течение карельской (около 1800 млн. лет) и каледонской (около 500 млн. лет) эпох. Общий золоторудный потенциал Кевактинского узла составляет 261,4 т, включая запасы ($C_1 + C_2$) месторождения Чертово Корыто (105,4 т) и суммарные прогнозные ресурсы золота (P_2) остальных объектов (156 т) при удельной продуктивности 0,685 т/км^2 [4].

Станнахский потенциальный золоторудный узел (221 км^2) выделен в пределах Гаричинской брахисинклинали, сходной по своему строению с Михайловской брахисинклиналью [5]. Узел характеризуется выраженной россыпной золотоносностью и установленными прямыми признаками рудной золотоносности. В его пределах известны пункты минерализации, первичные геохимические ореолы золота и многочисленные аномалии в рыхлых отложениях. Золоторудные объекты относятся к золото-сульфидно-кварцевой и золото-кварцевой формациям, и приурочены к тектоническим зонам с интенсивной гидротермально-метасоматической проработкой вмещающих углеродистых пород (окварцевание, сульфидизация, березитизация). В известных пунктах минерализации и первичных геохимических ореолах установлены содержания золота в пределах 0,2–1 г/т в сульфидизированных, окварцованных породах и отдельных кварцевых жилах (Киселёв В. А. и др., 1989 г.). Геологическая позиция, характер околорудного эпигенеза и золотоносности позволяют сопоставлять прогнозируемый Станнахский узел с

Кевактинским узлом, по аналогии с которым прогнозные ресурсы золота категории P_3 Станнахского узла составляют 76 т при удельной продуктивности 0,344 т/км [5].

Большетуюканский потенциальный золоторудный узел (108 км^2) охватывает Котлинскую брахисинклиналь и также выделен в качестве аналога Кевактинского рудного узла по результатам ГДП-200/2 (Пай В. М., Макарьев Л. Б. и др., 2019 г.). В геологическом строении Большетуюканского узла преобладают углеродистые и углеродсодержащие песчаниково-сланцевые отложения албазинской и михайловской свит, которые вмещают известные проявление золота Котлы и золотосодержащие проявления олова Находка, вольфрама Приозерное, локализованные в протяженных зонах жильно-прожилкового окварцевания и сульфидизации. Сходство Большетуюканского узла с Кевактинским аргументируется близостью геолого-структурных обстановок и признаками золотоносности черносланцевых образований, а полихронное формирование золотого оруденения (по модели Кевактинского узла) – установленным телескопированным характером минералообразования, выраженным в рудных зонах полистадийными генерациями кварцево-жильного материала и сульфидов. Прогнозные ресурсы золота Большетуюканского узла категории P_3 оценены по аналогии с эталонным Кевактинским узлом в количестве 37 т (Пай В. М., Макарьев Л. Б. и др., 2019 г.).

Уран. Урановое оруденение Тонодского рудного района рассматривается в составе урановой березитовой формации в зонах дробления гранитов и вмещающих метаморфических пород. Это оруденение контролируется долгоживущими разломами, обнаруживает пространственно-временную связь с гранитоидами чуйско-нечерского комплекса, локализуется в гранитах и вмещающих углеродистых сланцах и метапесчаниках, и развивается на участках телескопированного проявления раннего рудоподготовительного кремнещелочного метасоматоза и поздней околорудной березитизации (пропилит-березитовых изменений). Основными эпохами уранового рудообразования урана на Тонодском поднятии являются карельская и ранне-среднерифеская. Урановое оруденение, сформированное в течение этих эпох, было регенерировано в каледонское и, главным образом, раннегерцинское время [7]. Определившимся урановорудным рассматривается Туюканский узел, в качестве потенцильных урановорудных выделяются Амандракский и Когальский узлы.

Туюканский урановорудный узел расположен в краевой юго-западной части Кевактинского массива, где включает Туюканское месторождение и проявления урана Восточное, Западное и Натали. Геологические данные и реконструкция месторождения предполагают развитие наиболее масштабных руд в провесе кровли раннекарельских отложений михайловской свиты, частично эродированном в настоящее время. В подобной обстановке в углеродистых сланцах михайловской свиты локализовано рудопроявление Натали с наиболее богатыми настурановыми рудами. На Туюканском месторождении выявлены пять урановорудных залежей с жильным и штокверковым прожилково-вкрапленным оруденением. Руды месторождения часто обогащены сульфидами Pb, Zn, Ni, As, Cu, Ag и Au. Развита зона интенсивного окисления и выноса урана до глубины не менее 200 м. При установленных суммарных запасах и ресурсах в количестве 28,5 тыс. т удельная продуктивность Туюканского узла оценивается в 0,5 тыс. т/км^2. Месторождение считается рентабельным для отработки открытым способом с переработкой руд кучным выщелачиванием [7, 8]. Модель полихронного рудоформирования, предусматривающая образование основной массы рядового оруденения в конце раннего протерозоя и более богатых (телескопированных и локально-обособленных) концентраций на рубеже нижнего-среднего рифея, применима для гидротермального уранового оруденения Туюканского узла. Проявленный здесь стадийный урановорудный процесс выразился в формировании телескопированного оруденения в благоприятной геолого-структурной обстановке Туюканского месторождения и обособлении более позднего (раннесреднерифейского) жильно-прожилкового оруденения на его флангах, в частности, настурановых руд проявления Натали с возрастом 1234 ± 12 млн лет [6].

Амандракский потенциальный урановорудный узел (340 км^2) охватывает Амандракский массив лейкогранитов чуйско-нечерского комплекса и его экзоконтактовые зоны [4, 5]. Здесь известны 10 проявлений и пункты минерализации урана. Наиболее значимые урановые проявления сгруппированы на опоискованных участках Коллективный, Волка-Умакит, Хоной и менее изученных Удачный, Верный, Осенний, Сульфидный и Гаревый. В качестве благоприятной рудовмещающей среды выступают высокоспециализированные лейкограниты Амандракского массива и метаосадочные углеродистые породы албазинской свиты, изначально обогащённые ураном, который был неоднократно перераспределён в ходе регионально проявленных процессов метаморфизма, гранитизации, кремнещелочного метасоматоза и грейзенизации. Прогнозные ресурсы урана категории Р3 Амандракского узла оценены и поставлены на учет в количестве 30 тыс. т при удельной продуктивности 0,088 тыс. т/км^2 [4, 5].

Когальский потенциальный золото-урановорудный узел (80 км^2) выделен в 2019 г. по результатам геологического доизучения в границах Когальского массива лейкогранитов, включая отложения пурпольской свиты. Основную площадь узла занимают лейкократовые и двуслюдяные грейзенизированные граниты, радиогеохимически специализированные на уран при резко дифференцированном распределении урана. Важное значение придается эрозион-

но-тектоническому критерию. Геологические данные свидетельствуют о слабой степени эродированности Когальского массива, а широкое развитие на его площади нижнерифейских отложений пурпольской свиты является необходимым фактором наиболее полной сохранности гидротермального уранового оруденения от эрозионных процессов. На территории Когальского узла известно проявление урана Центральное, выявлено по результатам геологического доизучения проявление Когальское, а также пункты минерализации урана, вторичные геохимические ореолы и аномалии урана. С дополнительным привносом урана в ранне-среднерифейское время связываются установленные на проявлении Когальское аномальные концентрации урана до 0,1–0,2 %. По аналогии с Туюканским урановорудным узлом, в Когальском узле прогнозируется аналогичное урановое оруденение в зонах дробления гранитов, в том числе скрытое под нижнерифейским осадочным чехлом. Золотоносность рассматриваемого узла выражена повышенными концентрациями золота (до 0,5 г/т) в ураноносных конгломератах пурпольской свиты на комплексном проявлении Когальское, где закартированная площадь развития металлононосных конгломератов превышает 4 км^2. Для Когальского узла рассчитаны и поставлены на учет прогнозные ресурсы урана по категории P_3 в количестве 20 тыс. т при удельной продуктивности 0,25 тыс. т/км^2.

В числе ураноносных также рассматриваются площади Аяннахского и Семикачинского гранитоидных массивов (рис. 1). Аянахский массив выделяется дифференцированными уран-торий-калиевыми полями и характеризуется комплексной рудоносностью (уран, золото, вольфрам) с проявлением урана на перспективном участке Комплексный, проявлением тория, урана и редких земель Перевальное в нижнерифейских конгломератах, а также пункты минерализации, первичные и вторичные геохимические ореолы золота, вольфрама, урана. Площадь Семикачинского массива выделяется аномально низкими содержаниями тория и дифференцированными содержаниями урана с полями аномальных и пониженных концентраций. Урановые объекты представлены проявлениями на участках Поперечный, Крутой и многочисленными пунктами минерализации урана в зонах дробления гранитов и вмещающих пород [5].

Заключение. Анализ материалов проведенных поисковых работ и полученные за последние годы в рамках геологического доизучения новые данные позволяют оценить перспективы Тонодского поднятия на уран и золото с рекомендациями дальнейших геологоразведочных работ на этой территории. Перспективными на уран являются Туюканский урановорудный, Когальский и Амандракский потенциальные урановорудные узлы.

Туюканский урановорудный узел с наиболее масштабным в регионе гидротермальным урановым оруденением в зонах дробления гранитов и метаморфических пород частично охвачен специализированными поисками и здесь рекомендуется постановка поисково-оценочных работ первой очереди с целью оценки масштабов уранового оруденения на флангах Туюканского урановорудного поля. Прилегающий и менее изученный Когальский потенциальный золото-урановорудный узел также рекомендуется для постановки специализированных поисков первой очереди, нацеленных на локализацию участков, перспективных на выявление скрытого гидротермального уранового оруденения с возможными промышленными масштабами.

Амандракский потенциальный урановорудный узел оценивается как перспективный объект второй очереди для проведения специализированных поисков и поисково-оценочных работ. Рекомендуемые работы, ориентированные на выявление уранового оруденения для их дальнейшей оценки в пределах определившихся ураноносных структур и на выявление скрытого и слабопроявленного гидротермального уранового оруденения в новых геолого-структурных обстановках, в первую очередь, на Южно-Амандракской площади, включающей участки урановых проявлений Хоной и Волка-Умакит [1].

К потенциально перспективным отнесены Аянахская и Семикачинская площади одноименных гранитоидных массивов, которые рассматриваются в качестве резервных на уран, а также золото [5]. Постановка дальнейших ГРР на этих площадях зависит от результатов работ на первоочередных объектах.

В числе перспективных на золото с ожидаемым оруденением черносланцевого геолого-промышленного типа (типа Чертово Корыто) рассматриваются Станнахский и Большетуюканский потенциальные золоторудные узлы. Площади этих узлов не охвачены поисковыми работами и на них рекомендуется проведение специализированных поисков, очередность которых будет определяться результатами необходимых опережающих исследований.

Литература

1. Бабкин Н. Я. Эволюционные и глубинно-геологические факторы комплексного золото-уранового рудообразования Тонодского поднятия (Северное Забайкалье) / Н. Я. Бабкин, Н. А. Гребенкин, А. И. Корявко, П. С. Кузьменко, Н. В. Леденева // Материалы по геологии, поискам и разведке месторождений урана, редких и редкоземельных металлов, 2020. – № 161. – С. 47–59.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000. Лист О-49, 2012.

3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000. Лист O-50, 2010.
4. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200000. Лист O-50-I, 2016.
5. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200000. Лист O-50-II, 2016.
6. Макарьев Л. Б. Возраст и стадийность уранового оруденения Туюканского рудного узла (Тонодский район, Северное Забайкалье) / Л. Б. Макарьев, У. С. Ефремова, Р. Ш. Крымский, С. А. Сергеев // Региональная геология и металлогения, 2019. – № 77. – С. 67–74.
7. Макарьев Л. Б. Возраст и формационно-генетические особенности уранового оруденения Патомского нагорья / Л. Б. Макарьев, Ю. Б. Миронов // Разведка и охрана недр, 2020. – № 6. – С. 9–18.
8. Самович Д. А., Царук И. И., Кокарев А. А., Гаврилов Л. П., Митрофанов Е. А. Минерально-сырьевая база урана Восточной Сибири / Д. А. Самович, И. И. Царук, А. А. Кокарев, Л. П. Гаврилов, Е. А. Митрофанов. – Иркутск: Глазковская типография, 2012. – 163 с.

ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ УРАНА В МИНЕРАЛЬНЫХ ФАЗАХ АЛЕВРОЛИТОВ МЕТОДАМИ ЧАСТИЧНОЙ ЭКСТРАКЦИИ

А. И. Малов, С. Б. Зыков, А. С. Тышов

Институт геодинамики и геологии ФИЦКИА УрО РАН
г. Архангельск, Россия malovai@yandex.ru

ESTIMATION OF THE PROCESSES OF URANIUM ISOTOPES REDISTRIBUTION IN MINERAL PHASES OF SILTSTONES BY THE METHODS OF PARTIAL EXTRACTION

A. I. Malov, S. B. Zykov, A. S. Tyshov

Institute of Geodynamics and Geology FCIAR UB RAS
Arkhangelsk, Russia malovai@yandex.ru

The following mineral phases of core samples: adsorbed material, carbonate minerals, amorphous iron oxides, aluminosilicates partial digestion and crystalline iron oxides, aluminosilicates total digestion, and a clay/quartz resistant were extracted sequentially by treatment with: distilled water, fresh groundwater, EDTA, 0.5 M HCl, 15 M HNO_3, and fusion respectively. The concentration of adsorbed uranium was established in the amount of 16–364 ppb. The most insoluble fraction contains 1.65–13.7 ppm of U. Elevated values of $^{234}U : ^{238}U$ activity ratio prevail in the adsorbed material and iron hydroxides. In aluminosilicates and clay/quartz resistant, the values decrease.

Введение

Изотопы урана являются мощным инструментом для уточнения концептуальных моделей подземных вод и описания процессов химического выветривания на протяжении до сотен тысяч лет. Основными исходными параметрами при этом являются измеренные значения концентрации ^{238}U и отношения активностей изотопов урана $^{234}U : ^{238}U$ в растворе и твердой фазе. Они могут быть получены непосредственными измерениями в пробах воды и горных пород, отобранных в полевых условиях.

Однако интерпретация полученных результатов является достаточно сложной. Это связано с неоднородностью горных пород по составу. Например, песчано-глинистые отложения водоносных горизонтов могут содержать как слаборастворимые зерна кварца и полевого шпата, так и хорошо растворимый карбонатный цемент. Карбонаты, оксиды железа и глинистые минералы характеризуются повышенной адсорбцией U на их поверхностях. А дочерние нуклиды наиболее активно переходят в воду с поверхностных покрытий, повышая соотношение активностей изотопов в воде.

Кроме того, сходство отношений активностей изотопов урана $^{234}U : ^{238}U$ в подземных водах и в наиболее легко выщелачиваемых фракциях водовмещающих горных пород отмечалось в экспериментах Payne et al., Dabous et al. [1, 6]. Эти фракции определялись как адсорбированные элементы, карбонатные минералы и аморфные минералы железа [8]. Это может свидетельствовать об обратном процессе:

переходе неравновесных нуклидов из воды в породу с повышением в ней отношения активностей изотопов [3]. В таких условиях сложно оценивать скорость химического выветривания разработанными на настоящий момент методами.

Следовательно, для более полного понимания поведения изотопов урана в системе вода-порода необходим переход от представления только общих данных о концентрации и активности к дополнительному анализу для отдельных «слабых» выщелачивающих экстрагентов. В последние десятилетия данные по выщелачиванию, а не полное разложение широко используются в различных областях геоэкологии.

Поэтому в настоящей работе была предпринята попытка использовать процедуру частичной экстракции для реконструкции процессов перераспределения изотопов урана в определенных минеральных фазах водоносного горизонта песчано-глинистых месторождений венда. Формирование подземных вод в этом водоносном горизонте ранее рассматривалось в связи с решением таких экологических проблем, как: возможность водоснабжения крупных городов высококачественной питьевой водой за счет ресурсов подземных вод; возможность эксплуатации промышленного месторождения йода, связанного с подземными водами морских отложений Северо-Двинской впадины; опасность сброса соленых дренажных вод из эксплуатируемого месторождения алмазов в реку Золотицу [4, 5]. Эти моменты определяют экологическую значимость работы.

Материалы и методы

Пробы горных пород были отобраны из скважины ГГС 2-11, расположенной в районе месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова с координатами 65°20′48″ сш и 41°06′10″ вд. Она была пробурена с использованием алмазных коронок с внутренним диаметром 92 мм и наружным диаметром 112 мм до глубины 101,2 м в июле 2018 г. Эта скважина была выбрана потому что она вскрывает водоносный горизонт падунских отложений венда (Vpd), который представляет интерес в настоящем исследовании. Пять проб были взяты с интервалов 66,7–66,8; 75,2–75,3; 83,9–84; 94–94,1; 99,5–99,6 м (рис. 1). Пробы были быстро упакованы в воздухонепроницаемые полиэтиленовые пакеты. Масса каждого образца была около 1,5 кг. Пробы материала сушили в печи при температуре 40 °C в течение 7 дней и дезинтегрировали с помощью агатовой ступки и резинового пестика для прохождения через сито 125 мкм. Подготовленный материал хранили в стеклянных бутылках для частичного извлечения и изотопного анализа.

Химический и минералогический состав вендских отложений на территории месторождения алмазов детально изучен в разные периоды геологоразведочных работ [2]. Падунская свита (Vpd) состоит в основном из песчаников (60–80 %) и алевролитов (20–30 %); они разделяются прослоями аргиллитов. Цвет пород преимущественно красновато-коричневый с линзами и пятнами бледно-зеленого цвета. Среди песчаников преобладают мелкозернистые и среднезернистые разности. Содержание пелитовых частиц не поднимается выше 20 %. Обломочный материал представлен кварцем, в незначительных количествах присутствуют полевые шпаты, халцедон, обломки кварцитов, биотит, глинистые агрегаты. Цемент глинисто-железистый при гидрослюдистом составе глинистой составляющей; встречаются карбонатный и гипсовый цементы. В верхней части разреза мощностью порядка 50 м песчаники слабосцементированы, часто – до состояния песка. Для алевролитов характерно преобладание крупнозернистой (0,01–0,05 мм) фракции: до 70 %; почти постоянно присутствуют пелитовые частицы: до 30 %. Среди обломочных зерен до 98 % кварца, до 10 % полевых шпатов, около 1 % слюд. Цемент глинисто-железистый, карбонатно-глинистый, редко гипсовый. Глинистые минералы представлены гидрослюдами, каолинитом, хлоритом. Вверх по разрезу отмечается рост содержаний каолинита и снижение примеси хлорита вплоть до полного исчезновения. Для состава аргиллитов характерны гидрослюды, гидроокислы железа, хлорит. В отдельных прослоях фиксируется пиритизация. Количество частиц кварца и полевых шпатов – 10–15 %. Содержание карбонатов в породах падунской свиты минимально для всего вендского разреза, за исключением базальных слоев. Соотношение Fe_2O_3 и FeO в красных алевролитах составляет ~ 17 : 1, в зеленых алевролитах содержание Fe_2O_3 ниже в 2,7 раза. Фактически отсутствуют битумы и $C_{орг.}$.

Рис. 1. Фотографии образцов изученных горных пород

1 – зеленые алевролиты, 66,7–66,8 м. 2 – красные песчаники, 75,2–75,3 м. 3 – пестрые алевролиты, 83,9–84 м 4 – красные алевролиты, 94–94,1 м. 5–6 – зеленые алевролиты, 99,5–99,6 м (фото С. Дружинина).

Представительные аликвоты каждого образца керна обрабатывали различными реагентами, процедуры описаны ниже.

Дистиллированная вода

500 мл дистиллированной воды смешивали с 50 г образца керна в центрифужных пробирках и встряхивали в течение 1 часа с перемешиванием при комнатной температуре. Короткая продолжительность лабораторных экспериментов предполагает, что растворение зависит от легкости, с которой мелкие частицы могут быть освобождены от поверхности породы. Наиболее вероятно, что при этой процедуре высвобождаются главным образом сорбированные частицы.

Слабо минерализованные пресные природные подземные воды

500 мл слабоминерализованной воды Ca–Mg–Na–HCO_3 состава из скважины 3u с общей минерализацией 285 мг/л и концентрацией урана 0,25 мкг/л, смешивались с 50 г образца керна в центрифужных пробирках и встряхивались в течение 1 часа при комнатной температуре. Граничные условия были следующими: температура 20 °C, pH 7,7 и Eh 230 мВ. Наиболее вероятно, что при этой процедуре также высвобождаются сорбированные частицы.

Следующие четыре этапа были выполнены в соответствии с методом, предложенным Sutherland et al. [7].

0,05 M ЭДТА

Комплексанты, такие как ЭДТА, используются для высвобождения легкодоступной (лабильной) фракции материалов, которая в настоящем исследовании представляет собой карбонатный цемент. 500 мл 0,05 M ЭДТА (pH 7) смешивали с 50 г образца керна в центрифужных пробирках и встряхивали в течение 1 часа при комнатной температуре.

0,5 M HCl

Согласно обзору Sutherland et al. [7], соляная кислота (HCl) растворяет комплексные, адсорбированные, осажденные, аморфные или плохо кристаллизованные соединения Fe без значительного воздействия на кристаллическую решетку. В настоящем исследовании 500 мл 0,5 M HCl смешивали с 50 г образца керна и встряхивали при комнатной температуре в течение 1 часа.

15 M HNO_3

Азотная кислота (HNO_3) является окислителем, который не так сильно воздействует на алюмосиликаты, как фтористоводородная кислота (HF), и поэтому растворяет их частично. Кроме того, кристаллический оксид железа также растворяется горячей HNO_3. В настоящем исследовании 500 мл 15 M HNO_3 смешивали с 25 г образца керна и нагревали в течение 1 часа при перемешивании. Полученный раствор упаривали до влажных солей, доливали 500 мл дистиллированной воды и подкисляли HCl до pH 1–2.

Измерения изотопов урана после пяти частичных экстракций

Определения изотопов урана в полученном растворе были сделаны в соответствии с Методикой ВИМС. Спектрометрическое обнаружение альфа-частиц осуществляли с использованием альфа-спектрометра с погрешностью 10–15 %. Общая ошибка анализа определяется как $\delta = \delta st + \delta sys$ (статистическая + систематическая), измерения неопределенностей для U сообщаются индивидуально. Эффективность извлечения ^{232}U составляла 40–50 %.

Полное растворение

Определения изотопов урана были выполнены в соответствии с Методикой ВИМС.

Результаты и их обсуждение

Растворение вещества

В целом, процентные значения вещества, растворенного под воздействием различных растворителей, приблизительно соответствуют среднему химическому составу алевролитов и песчаников падунской свиты венда в районе исследования. ЭДТА, самый слабый экстрагент после пресных подземных вод, растворял до 3,4 % вещества. Это соответствует потерям при прокаливании 2,74–3,36 %, т. е. карбонатному материалу цемента исследуемых пород и другим лабильным фракциям. До 3 % вещества дополнительно растворялось в 0,5 M HCl, что соответствует содержанию Fe_2O_3 (2–5,3 %), то есть связано с аморфными оксидами железа. До 9 % вещества, которое может быть представлено только наиболее легко растворимыми алюмосиликатами, дополнительно растворялось 15 M HNO_3. Смесь 15 M HNO_3 + 12 M $HClO_4$ + 29 M HF кислот растворяет остаток алюмосиликатов и глинисто-кварцевый резистент.

Концентрация урана

В таблице 1 приведены концентрации урана в пересчете на минеральные фазы в мкг/кг и %. В красных алевролитах и песчаниках концентрации сорбированного урана были установлены в размере 15,8 ± 2,1–30,5 ± 3,9 мкг / кг. Это составляет 0,35–1,6 % от общего его количества в породах этого типа. Карбонатные минералы содержат еще меньше урана: 7 ± 1–19,8 ± 2,5 мкг/кг. В гидроксидах железа и наиболее легко растворимых алюмосиликатах концентрации урана находятся в пределах 52,7 ± 7,2–133 ± 19 и 35 ± 5–159 ± 21 мкг/кг, соответственно. Это составляет в общей сложности 3,7–11,1 % от общей концен-

Таблица 1. Ежесуточное поступление актиноидов из атмосферы

Минеральные фазы	Сорбиро-ванные элементы	Карбонатные минералы и другие лабильные фракции	Аморф-ные оксиды железа	Растворимые алюмосиликаты, кристаллические оксиды железа	Алюмосиликаты и глинисто-кварцевый резистат
U, мкг/кг					
Красноцветные породы	15,8 ± 2,1 30,5 ± 3,9	7 ± 1 19,8 ± 2,5	133 ± 19 52,7 ± 7,2	35 ± 5 159 ± 21	4319 ± 447 1648 ± 210
Пестроцоцветные породы	30.9 ± 4.1	109 ± 15	90 ± 11	873 ± 113	4738 ± 469
Зеленоцветные породы	106 ± 14 364 ± 43	751 ± 89 1496 ± 163	1157 ± 123 848 ± 95	3072 ± 309 1249 ± 131	13714 ± 1097 4371 ± 371
U, %					
Красноцветные породы	0,35 1,6	0,16 1	3 2,8	0,7 8,3	95,8 86,3
Пестроцоцветные породы	0,53	1,87	1,54	14,96	81,1
Зеленоцветные породы	0,56 4,37	4 18	6,15 10,2	16,3 15	72,9 52,5

трации. Наиболее нерастворимая фракция содержит 1,6 ± 0,2–4,3 ± 0,4 мг/кг урана. В зеленых алевролитах концентрация адсорбированного урана значительно выше: 106 ± 14–364 ± 43 мкг/кг (0,56–4,37 %). Карбонатные минералы и аморфные оксиды железа содержат в общей сложности 1,91 ± 0,21–2,34 ± 0,26 мг/кг урана (10,15–28,2 %). В алюмосиликатах и глинисто-кварцевом резистенте концентрация урана составляет 5,6 ± 0,5–16,8 ± 1,4 мг/кг.

Отношение активностей изотопов урана $^{234}U : ^{238}U$

Повышенные значения отношения активностей $^{234}U : ^{238}U$ были отмечены в материале красных алевролитов и песчаников, растворенных в воде и 0,5 М HCl. То есть изотопы урана с повышенными значениями отношения активности $^{234}U : ^{238}U$ (более 1) осаждались из грунтовых вод на сорбирующем материале и с гидроксидами железа. Пониженные значения отношения активностей $^{234}U : ^{238}U$ (менее 1) характерны для наиболее труднорастворимых фракций, в которых растворение урана подземными водами практически отсутствовало, и только потеря атомов ^{234}U происходила вследствие эффекта отдачи ^{234}Th при радиоактивном распаде ^{238}U в породе. В зеленых алевролитах также наблюдается тенденция к уменьшению оотношения активностей $^{234}U : ^{238}U$ в направлении от легко растворимых фракций к труднорастворимым фракциям (интервал 99,5–99,6 м). Однако для образца, взятого с интервала 66,7–66,8 м, высокие значения соотношения активности $^{234}U : ^{238}U$ наблюдаются во всех минеральных фазах. Дополнительные исследования необходимы, чтобы объяснить этот факт.

Заключение

Процедура частичной экстракции была использована для реконструкции процессов перераспределения изотопов урана в минеральных фазах водоносного горизонта песчано-глинистых месторождений венда. Красные алевролиты и песчаники обеднены ураном в относительно легко растворимых минеральных фазах. Наиболее нерастворимая фракция содержит 1,65 ± 0,21–4,32 ± 0,45 мг/кг урана. В зеленых алевролитах концентрация адсорбированного урана намного выше. В алюмосиликатах и глинисто-кварцевом резистенте концентрации урана составляют 5,6 ± 0,5–16,8 ± 1,4 мг/кг. Такое распределение урана в различных типах пород согласуется с более ранним предположением об удалении урана из красных алевролитов в последние 0,9 млн лет и его сохранении в зеленых алевролитах [3]. Повышенные значения отношения активностей $^{234}U : ^{238}U$ преобладают в адсорбированном материале и гидроксидах железа. В алюмосиликатах и глинисто-кварцевом резистенте значения уменьшаются. Это свидетельствует о замене первичного седиментогенного урана вторичным гидрогенным ураном, адсорбированным на поверхности минералов и соосажденным с гидроксидами железа. В будущем планируется исследовать влияние изменений граничных условий (t, pH, Eh, M) слабоминерализованных пресных природных подземных вод на частичную экстракцию урана.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-05-00045_А).

Литература

1. Dabous A. A., Uranium/thorium isotope evidence for groundwater history in the Eastern Desert of Egypt // J. Arid Environ., 2002. – V. 50. – P. 343–357.
2. Malov A. I. Water-Rock Interaction in Vendian Sandy-Clayey Rocks of the Mezen Syneclise // Lithol. Miner. Resour., 2004. – V. 39. – No. 4. – P. 345–356.
3. Malov A. I. Evolution of the uranium isotopic compositions of the groundwater and rock in the sandy-clayey aquifer // Water (Switzerland), 2017. – V. 9 (12). – P. 910.
4. Malov A. I. Evolution of the groundwater chemistry in the coastal aquifers of the south-eastern White Sea area (NW Russia) using ^{14}C and ^{234}U–^{238}U dating // Science of the Total Environment, 2018. – V. 616–617. – P. 1208–1223.
5. Malov A. I., Kiselev G. P., Rudik G. P. Uranium in Groundwater of the Mezen Syneclise // Doklady Earth Sciences, 2008. – V. 421A. – № 6. – P. 965–968.
6. Payne T. E., Edis R., Fenton B. R., Waite T. D. Comparison of laboratory uranium sorption data with 'in situ distribution coefficients' at the Koongarra uranium deposit, Northern Australia // J. Environ. Radioact., 2001. – V. 57. – P. 35–55.
7. Sutherland R. A., Tack F. M. G., Tolosa C. A., Verloo M. G. Metal Extraction from Road Sediment using Different Strength Reagents: Impact on Anthropogenic Contaminant Signals // Environ Monit Assess, 2001. – V. 71-3. – P. 221–242.
8. Yanase N., Nightingale T., Payne T., Duerden P. Uranium distribution in mineral phases of rock by sequential extraction procedure // Radiochim. Acta, 1991. – V. 52–53. – P. 387–393.

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЁР ОБЬ-ЧУЛЫМСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ (ВАСЮГАНЬЕ)

Г. И. Малов[1,2], В. Д. Страховенко[2], Е. А. Овдина[2]

[1]Томский политехнический университет
Томск, Россия, malov_gosha@mail.ru
[2]Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН
Новосибирск, Россия, strahova@igm.nsc.ru, ovdina@igm.nsc.ru

RADIOECOLOGICAL ASSESSMENT OF LACUSTRINE ORGANOMINERAL BOTTOM SEDIMENTS OF THE OB-CHULYM INTERFLUVE (VASIUGAN)

G. I. Malov[1], V. D. Strahovenko[2], E. A. Ovdina[2]

[1]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, malov_gosha@mail.ru
[2]V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
Novosibirsk, Russia, strahova@igm.nsc.ru, ovdina@igm.nsc.ru

Various components of lake systems, territories on the territory of the Ob-Chulym interfluve (Vasyugane) were investigated for the content of natural and artificial radionuclides in accordance with the requirements of GOST. The aim of this work is to assess the radiation state of organic-mineral bottom sediments, taking into account their natural characteristics. It was found that the values of the total effective specific activity (Ac) for natural radionuclides for all lakes are below the norm (in accordance with the requirements of GOST). In terms of the content of artificial radionuclides, the study showed that the horizons in stratified deposits of sapropels of lakes do not correspond to radiation and hygienic standards, but for most lakes, the horizons of cesium accumulation are the upper 60 cm.

Введение

Сапропель – органоминеральные донные отложения водоемов, формирующиеся в результате преобразования вещества и энергии в ходе биохимических, микробиологических, механических процессов из остатков отмирающих растительных и животных организмов и привносимых в водоемы органических и минеральных примесей. Благодаря широко распространённости малых озёр, многофакторности

осадконакопления, а также стратификации отложений – донные отложения озёр являются одним из наилучших объектов исследования для оценки состояния окружающей среды.

Вследствие проведенных испытаний на Семипалатинском и Новоземельском ядерных полигонах, начиная с 1949 года, а также учитывая аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году и на АЭС Фукусима-1 в 2011 году. Так на территории Томской области прослеживаются признаки сильного отклонения радиационной обстановки от регионального фона по уровням накопления цезия-137 и строиция-90 (Чаинский, Каргасокский и др. районы) и также в ряде населенных пунктов Томской области (Усть-Озерное, Средний Васюган, Сторгин, Прохоркино и др.), где в мае-июне 1990 г. плотность выпадения ^{137}Cs составляла соответственно 0,45; 0,42; 0,37; 0,39 Ки/км^2, что соответствует объемной активности почв более 1000 Бк/кг при среднем объемном весе почв Томской области во влажном состоянии 1,29 кг/дм^3 [7]. Так же близ территории исследования, восточнее расположена территория подверженная радиоактивному загрязнению в связи с аварией на СХК 6 апреля 1993 года [1].

В качестве индикатора (маркера) радиоактивного загрязнения и уровня радиационного воздействия, как в России, так и за рубежом используется ^{137}Cs. В России нормируемым показателем загрязнения являются удельная активность (Бк/кг) и плотность выпадения (запас) ^{137}Cs в почве в мКи/км^2. Для территории Западной Сибири путем экспертной оценки многих архивных, расчетных и экспериментальных (измерения содержаний ^{137}Cs в почвах) данных получена величина глобального фона активности ^{137}Cs в почвах, равная 50 мКи/км^2 (1,85 кБк/м^2) на 1995 год [2]. В статье 2000 года и в материалах 2005 года академик Израэль Ю. А. опубликовал карту запасов ^{137}Cs (мКи/км^2) в пересчете на 2000 год и показал, что глобальный радиационный мониторинг проведенный в 1990х гг., при помощи аэрогаммаспектральной съемки с практически повсеместным пробоотбором, выявил, что существует широтная зональность в распределении загрязнения ^{137}Cs. Максимальные значения глобального радиационного фона приходятся на широтные пояса 40–50° и 50–60° с. ш. (для широтного пояса 50–60° с. ш. радиационный фон, обусловленный ^{137}Cs, варьирует в диапазоне 18–54 мКи/км^2. К северу и югу от них значения уменьшаются [5, 6].

Для комплексной оценки радиационного состояния изучены различные компоненты озёрных систем (донные отложения (ДО), почвы, водная растительность), расположенных на юге Западной Сибири, на территории Обь-чулымского междуречья (Васюганье) (Рис. 1.). В работе исследуются 7 озёр (Яково, Щучье Базовое, Лайское-1, Лайское-3, Малое Щучье, Щучье около оби. Д. Кипрюшка, Круглое), все озёра являются малыми, бессточными, интразональными и со сменяющейся температурной стратификацией. Для озёр характерен сплавинный тип зарастания, площадь зарастания не превышает 10 %. Сплавины образованы характерной болотной растительностью с преобладанием сфагновых мхов.

Методы исследования

Мощность отложений сапропеля определялась непосредственным зондированием (эхолотом). Отбор проб донных отложений проводится цилиндрическим пробоотборником с вакуумным затвором конструкции НПО «Тайфун» (диаметр 82 мм, длина 100 см). Опробование керна донных отложений проводится по 5 см, редко по 10 см. Отбор водных проб осуществляется по стандартным методикам (ГОСТ 31861, 2012). В полевых условиях проводится определение pH, Eh, минерализации с помощью прибора АНИОН-7000. Отбор почвенных проб осуществлялся металлическим кольцом (диаметр 82 мм и высота 50 мм), для каждого конкретного почвенного разреза использовалась схема непрерывного опробования кольцом в верхних 30 см, а далее по генетическим горизонтам. Пробоподготовка проведена путем высушивания образцов до воздушно-сухого состояния, их дальнейшего дробления и измельчения для проведения анализов.

По всем пробам выполнены общетехнические анализы (влажность, зольность, состав неорганической и органической частей сапропеля). Изучение морфологии, фазового состава образцов донных отложений проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TESCAN MIRA 3 (Tescan, Чехия), снабженного энергетиче-

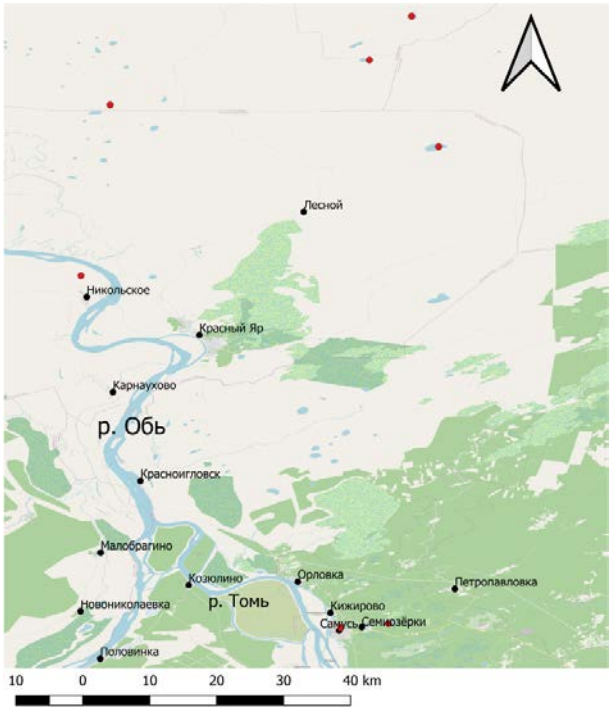


Рис. 1. Карта-схема точек опробования исследуемых озёр

ским спектрометром «OXFORD XMAX 450+» (Oxford Instruments, Великобритания). Естественные радионуклиды и радиоцезий определялись гамма-спектрометрическим методом на гамма-спектрометрах с колодезными сцинтилляционными кристаллами NaI (Tl) размерами 200 × 200 и 150 × 150 мм. Анализы выполнены научными сотрудниками аналитического центра ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

Для сапропеля как общераспространённого полезного ископаемого, согласно ГОСТу 54000-2010, необходимо проводить радиоэкологическую оценку сырья, на соответствие радиационно-гигиеническим нормам по активности естественных и искусственных радионуклидов. Для этого вычисляется суммарная эффективная удельная активность (Ас) от естественных радионуклидов по формуле (с учетом коэффициентов): Ас = ARa + 1,31 ATh + 0,085 AK, где ARa, ATh, AK – удельные активности соответствующих радионуклидов. Норма значений Ас для естественных радионуклидов составляет не более 300 Бк/кг, а для техногенных – не более глобального фона (30 мКи/Км^2,или же ≈ 20Бк/Кг) [3].

По результатам анализов с помощью программного пакета Qgis 3.8.3 были построены карты-схемы распределения естественных и искусственных радиоактивных элементов для почв, ДО и растительности. Интерполяция данных проводилась методом ОВР (коэффициент расстояния 2).

Результаты

Наше исследование показало, что по содержанию естественных радионуклидов в сапропелях все озёра соответствуют радиационно-гигиеническим нормам. Значения Ас варьируются от 51 до 196 Бк/Кг в ДО, от 66 до76 Бк/Кг в почвах, от 56 до326 Бк/Кг в водной растительности (рис. 2). Интересной особенностью является повышенное содержание Ас в донных отложениях по сравнению с почвами (рис. 3). Причём содержание Th и K между почвами и донными отложениями для всех озёр примерно равны, разница в Ас наблюдается из-за повышенного содержания урана в ДО. Исследуемые озёра богаты органикой, (зольность редко превышает значения 40). При разложении, которой создаются благоприятные условия

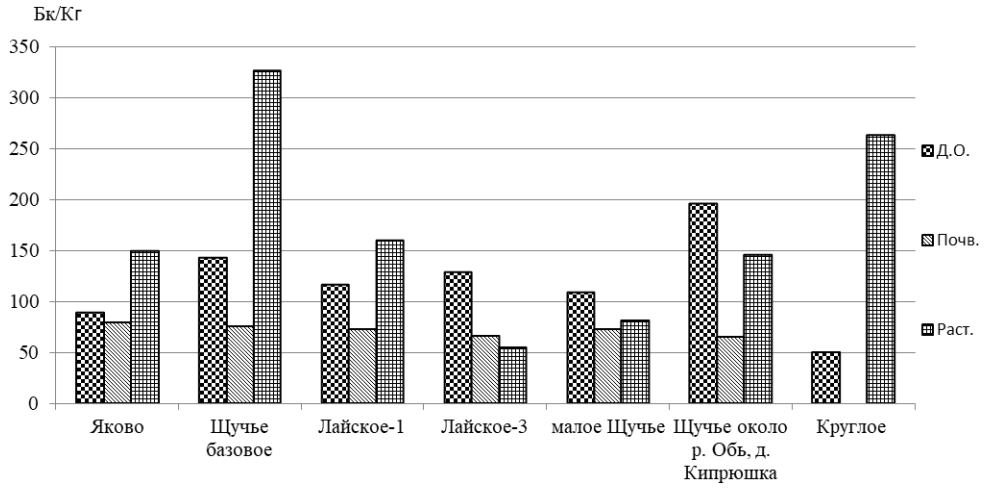


Рис. 2. Содержание Ас в различных компонентов озерных систем

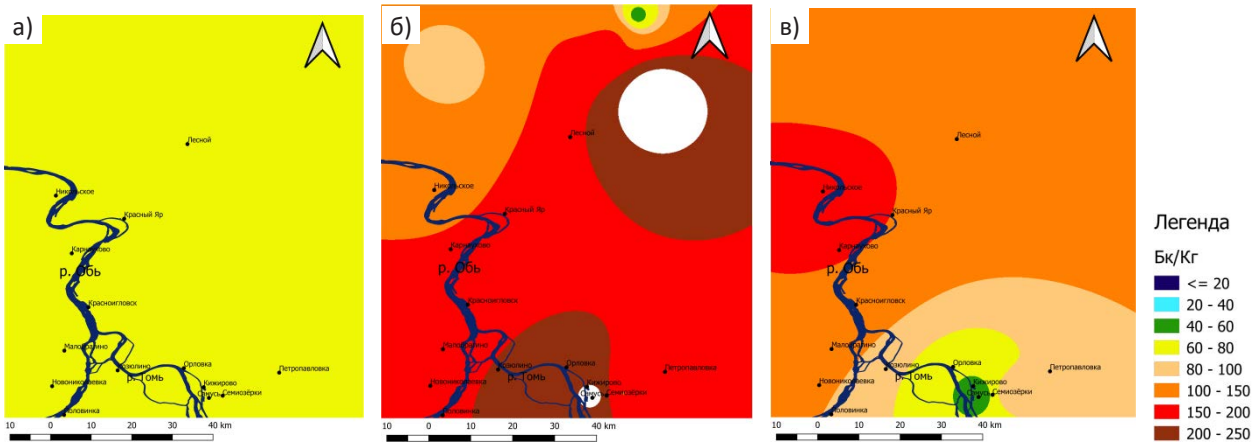


Рис. 3. Распределение суммарной эффективной удельной активности (Ас) естественных радионуклидов для почв(А), биоты (Б) и донных отложений (В)

для накопления урана. Большой диапазон значений Ас для растительности объясняется неоднородностью видового состава для каждого из озёр, при том даже в пределах одного озера видовой состав растительности сильно разница.

В качестве искусственных радионуклидов исследовался ^{137}Cs. Удельная активность в почвах водосборных площадей для исследуемых озёр варьируется от 6 до 26 Бк/кг, 34–185 Бк/кг для ДО, 3–56 Бк/кг для растительности (рис. 3.). Значения активности ^{137}Cs максимальны для ДО и минимальны для почв (рис. 4). Для района исследования характерны кислые почвы, что создаёт благоприятные условия для миграции ^{137}Cs из почв в донные отложения озёр. При этом накопление в ДО происходит в верхних частях разреза, где происходит постоянное перераспределение в системе растительность–ДО, и уменьшается к низу. Растительность охотно накапливает К и вместе с ним ^{137}Cs, при отмирании они попадают в ДО откуда их снова забирают растения. Но так же для оз. Щучье малое обнаружены повышенные значения ^{137}Cs в середине разреза на гл. 220–250 см (рис. 5). Предположительно это остатки выпадений радиоактивных осадков, которые проходили на данной территории во время проведении ядерных испытаний. Такие же закономерности распределения ^{137}Cs по разрезам донных отложений характерны и для других озёр юга Западной Сибири. Но отдельно стоит отметить, что для исследуемых озёр характерны очень жидкие верхние слои, которые длительное время перемешиваются волновыми колебаниями воды озер и из-за малой плотности осадка, стратифицированнойсть верхних горизонтов может быть нарушена. И как следствие глубина проникновения

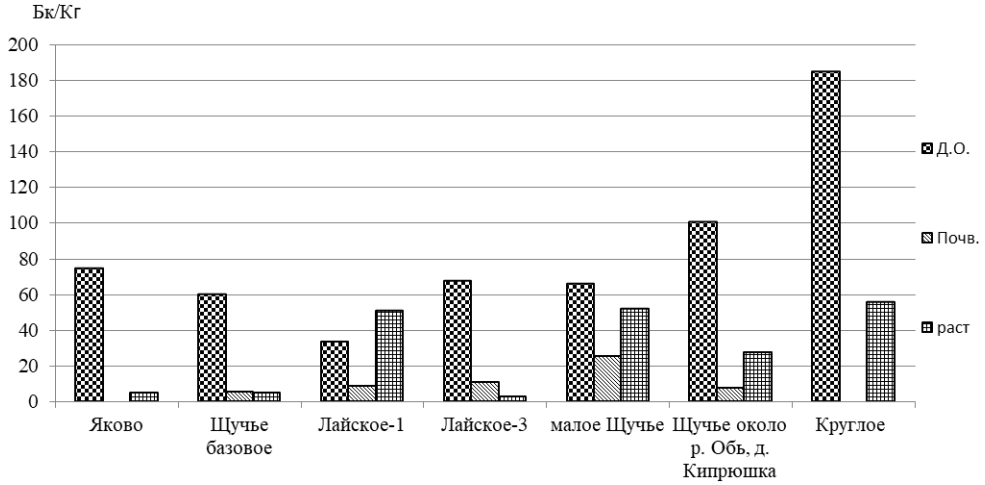


Рис. 4. Содержание удельной активности ^{137}Cs в различных компонентов озерных систем

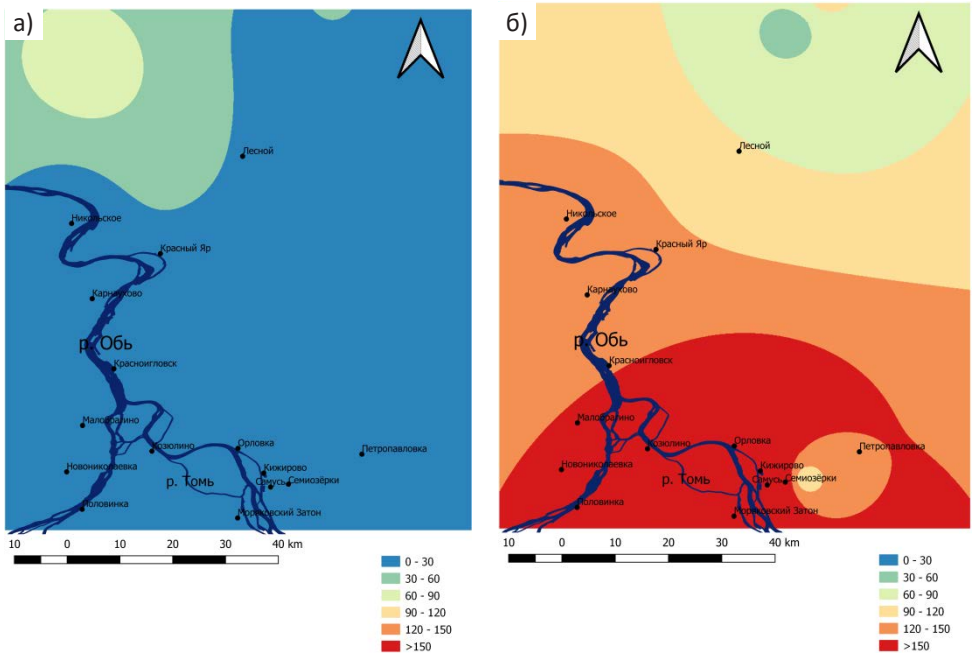


Рис. 5. Распределение площадной активности ^{137}Cs для почв (А) и донных отложений (Б)

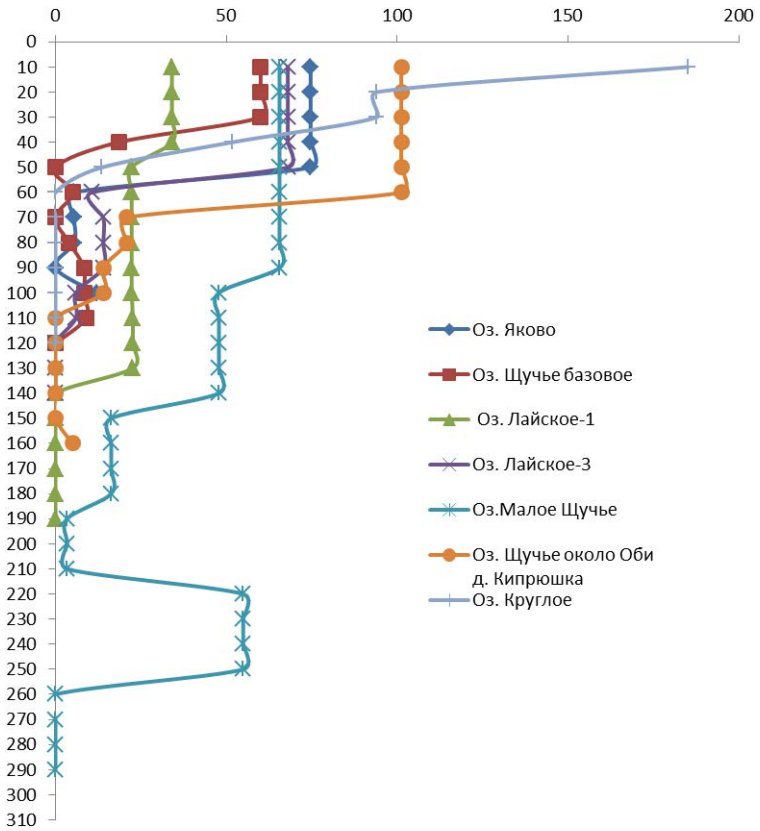


Рис. 6. Вертикальное распределение удельной активности ^{137}Cs (Бк/кг) по разрезам донных отложений

повышенных содержаний ^{137}Cs может доходить до 60 см, а активность радиоцезия появляется уже на глубине 160–180 см, что значительно глубже чем в озерах с выдержанной стратификацией слоёв других территорий Западной Сибири [9].

Заключение

Радиоэкологическая оценка показала, что все озёра по содержанию естественных радиоактивных элементов соответствуют нормам ГОСТ Р 54519. Ас в ДО в целом соответствуют Ас в почвах водосборов, а повышенные содержания U объясняются накоплением его за счёт большого количества органического вещества в озёрах. По содержанию искусственных радионуклидов (^{137}Cs) исследование показало, что отдельные горизонты в стратифицированных залежах сапропелей озёр не соответствуют радиационно-гигиеническим нормам, и для большинства озёр горизонтами накопления цезия являются верхние 60 см.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Литература

1. Алексахин Р. М., Булдаков Л. А., Губанов В. А. и др. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Под ред. Л. А. Ильина, В. А. Губанова : монография. – М. : Издат, 2001. – 751 с. – С. 528–567.
2. Болтнева Л. И., Израэль Ю. А., Ионов В. А., Назаров И. М. Глобальное загрязнение ^{137}Cs и ^{90}Sr и дозы внешнего облучения на территории СССР // Атомная энергия. Том 42, вып. 5, 1977. – С. 355–360.
3. ГОСТ 31861 Вода. Общие требования к отбору проб. Межгосударственный стандарт, 2012.
4. ГОСТ Р 54519. Удобрения органические. Методы отбора проб. Национальный стандарт РФ 2011.
5. Израэль Ю. А. Антропогенное радиоактивное загрязнение планеты Земля Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий: Материалы международной конференции. // Гидромет, Москва, 2005. – С. 13–24.
6. Израэль Ю. А., Е. В. Квасникова, И. М. Назаров, Е. Д. Стукин. Радиоактивное загрязнение цезием-137 территории России на рубеже веков. // Метеорология и гидрология, 2000. – № 4. – С. 20–31.
7. Рихванов Л. П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии: учебное пособие. – Томск: STT, 2009. 430 с.
8. Семенков И. Н., А. Ю. Мирошников, А. А. Усачева Распределение цезия-137 глобальных выпаде-

ний в таежных и тундровых катенах бассейна реки Обь // Геология рудных месторождений, 2015. – Т. 57. – № 2. – С. 154–173.
9. Страховенко В. Д., Щербов Б. Л., Маликова И. Н., Восель Ю. С. Закономерности распределения радионуклидов и редкоземельных элементов в донных отложениях озер различных регионов Сибири // «Геологии и Геофизики», 2010. – Т. 51. – «Гео», Новосибирск. – С. 1501–1514.

ОТРАБОТКА УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ, КАК ФАКТОР ВЛИЯНИЯ НА РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ РЕГИОНА (НА ПРИМЕРЕ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ)

П. М. Маниковский

Забайкальский государственный университет
Чита, Россия, manikovskiypm@yandex.ru

MINING OF COAL DEPOSITS WITH A HIGH CONTENT OF NATURAL RADIONUCLIDES AS A FACTOR OF INFLUENCE ON THE RADIATION-ECOLOGICAL STATE OF THE REGION (ON THE EXAMPLE OF THE TRANSBAIKAL TERRITORY)

P. M. Manikovsky

Transbaikal State University
Chita, Russia, manikovskiypm@yandex.ru

Today, under the pressure of "green" organizations, the use of coal in the generation of energy in the world as a whole is decreasing; especially clearly this trend can be traced in the European region. Nevertheless, according to forecasts of both consulting companies and representatives of government agencies, coal will have a significant share in energy production for several more decades, and the countries of the Asia-Pacific region continue to increase coal imports, despite a number of negative factors that all countries of the world will face in 2021 [1, 2].

Введение

Говоря о ситуации в угольной отрасли Российской Федерации, следует сказать, что в 2020 году в структуре Российского экспорта угля ключевые позиции заняли страны Азии. Основными направлениями экспорта стали: Китай (29,4 млн. т), Республика Корея (23,1 млн. т) и Япония (21,4 млн. т). Кроме того, в сравнении с 2019 годом значительный рост показал экспорт в Турцию (+56,6 % г/г) и Тайвань (+31,5 % г/г). В то же время за 2020 год существенно снизился экспорт угля в европейские страны, в первую очередь в Германию (–53,1 % г/г) и Нидерланды (–23,8 % г/г) (Рис. 1).

Это обусловлено экономическим спадом и сокращением выработки электроэнергии угольными станциями. В последние годы в Европе быстро развивается возобновляемая энергетика: так, по итогам 2020 года доля выработки электроэнергии на базе возобновляемых источников в Европе составила 20 % (в т. ч. в Дании – 61 %, в Германии – 33 %, и в Испании – 29 %) (Рис. 2) [1].

Тем не менее, согласно прогнозам, как консалтинговых компаний, так и представителей государственных структур, уголь еще на протяжении нескольких десятилетий будет иметь существенную долю в производстве энергии, а страны Азиатско-тихоокеанского региона продолжают наращивать импорт угля, несмотря на целый ряд негативных факторов, с которыми столкнулись все страны мира в 2021 году [1, 2].

Структура угольной генерации в единой энергетической системе России находится на первой позиции. Учитывая её долю в 66,56 % относительно общей генерации энергии, а также опираясь на Программу развития угольной промышленности России на период до 2035, года можно с уверенностью констатировать, что на протяжении длительного времени, как минимум до 2050 года угольная отрасль будет находиться в состоянии стабильного развития и глубокой стагнации не произойдёт (Рис. 3).

Учитывая тренд на увеличение доли возобновляемой энергетики, который прослеживается в европейском регионе в целом, для обеспечения конкурентоспособности Российских угольных компаний

Правительством РФ была разработана и 13 июня 2020 г. принята к реализации Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года [3].

Она включает три этапа своей реализации: I этап 2019–2025 годы, II этап 2026–2030 годы, III этап 2031–2035 годы.

Сами по себе, предприятия по добыче угля являются источниками комплексного негативного воздействия на окружающую среду. Связано это с большой площадью отчуждаемых территорий при разработке месторождений открытым способом, выбросами угольной пыли в атмосферу, как при отработке угольных разрезов, так и при осуществлении вентиляции угольных шахт.

Помимо этого, еще более весомым является фактор загрязнения воздуха летучими веществами, которые образуются при сжигании угля на ТЭС (тепловых электрических станциях), в основном городских (ГРЭС) и золошлаковыми отходами, которые образуются при использовании угля в качестве топлива. Содержащиеся в виде примесей в таких отвалах тяжелые металлы и их соединения в конечном итоге с водой попадают в почву, вызывая ее загрязнение.

Учитывая фактор ужесточения требований к качеству угольной продукции, в частности к проблемам радиационного загрязнения естественными радионуклидами (ЕРН) особого внимания требует контроль над содержанием ЕРН в угольном топливе. ЕРН накапливаются как в отвалах ТЭС, так и в виде аэрозолей попадают в атмосферу [4].

Известно, что верхние окисленные части угольных пластов некоторых месторождений (Казахстан, Забайкальский край Российской Федерации) сопровождаются урановой минерализацией. Выделяют угли с нижекларковым и кларковым содержанием урана, ураноносные угли и месторождения урана в углях (ураноугольные). Кларк урана в углях находится

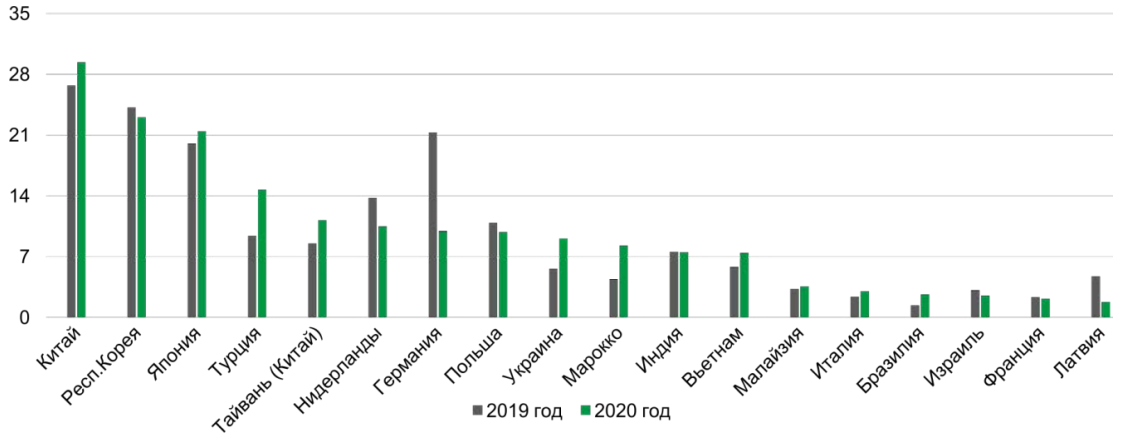


Рис. 1. Направления экспорта угля из России за 2020 год (по крупнейшим потребителям, млн. т.) по данным Федеральной таможенной службы России

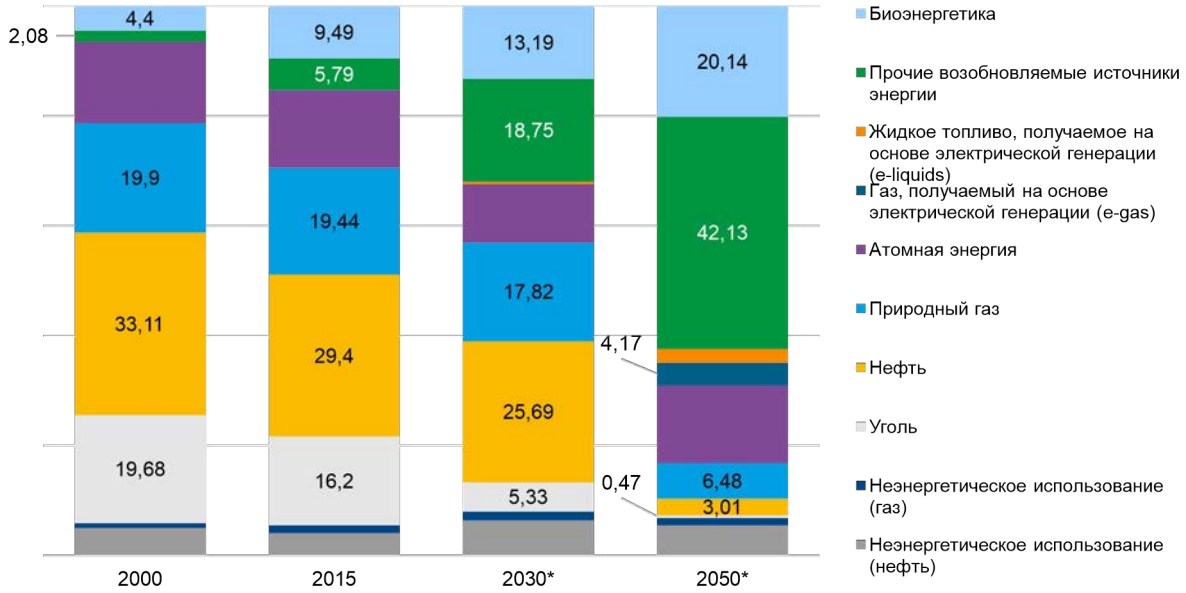


Рис. 2. Эволюция структуры потребления энергии ЕС, в процентах, по данным The European Council on Foreign Relations (ECFR)

в интервале 1–3,6 г/т., принимается для углей мира 2 г/т [5]. Содержание урана в ураноносных углях примерно на математический порядок и более превышает кларковый уровень.

Радиационное воздействие на окружающую среду, персонал и население оказывают добыча и обогащение таких углей. Наибольшую же нагрузку вызывает использование угля в качестве энергетического топлива.

Опасность ионизирующего излучения возрастает при переходе от угля к золе и шлаку. Так, сжигание опытной партии бурых ураноносных углей Уртуйского месторождения показало, что содержание урана в золошлаковых отходах увеличивается в 3–5 раз по сравнению с исходным углем. Из чего можно сделать вывод о повышенном содержании ЕРН в почве на месте складирования подобных отходов. Радиационную опасность источника воздействия характеризуют величиной удельной эффективной активности ($A_{эфф}$). Эффективная активность для равновесных условий учитывает содержание ЕРН в рудах или углях и вмещающих породах, а также в производственных отходах.

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1{,}31\ A_{Th} + 0{,}085\ A_{K},$$

где A_{Ra} и A_{Th} – удельная активность изотопа ^{226}Ra, продукта распада ^{238}U и ^{232}Th, находящихся в радиоактивном равновесии с остальными членами рядов соответственно, $A_{к}$ – удельная активность ^{40}К, (Бк/кг). Эта величина характеризует мощность дозы гамма-излучения, создаваемую большими массами материала с равномерным распределением радионуклидов.

На текущий момент исследование на присутствие ЕРН проведены на 4 разрезах Забайкальского края: Харанорском (Харанорское буроугольное месторождение), Восточном (Татауровское буроугольное месторождение), Уртуйском (Уртуйское буроугольное месторождение), Кутинском (Кутинское месторождение бурого угля) [6, 7].

Материалы и методы: анализ угольных месторождений Забайкальского края. Согласно данных Росстата, в 2020 году в Забайкальском крае добыча угля сократилась на 16,8 % по отношению к 2019 году и составила ориентировочно 17 млн. т., что составляет 4,2 % от общей добычи угля в России в 2020 году [9]. Сокращение было вызвано ограничениями, с которыми столкнулись все промышленные производства в период пандемии и падением цен на энергоресурсы, а также в связи с консервацией добычи на Апсатском угольном разрезе (ООО «Арктические разработки») (Рис. 4).

Результаты и их обсуждение. В работах Г. П. Сидоровой освещается метод отработки углей с по-

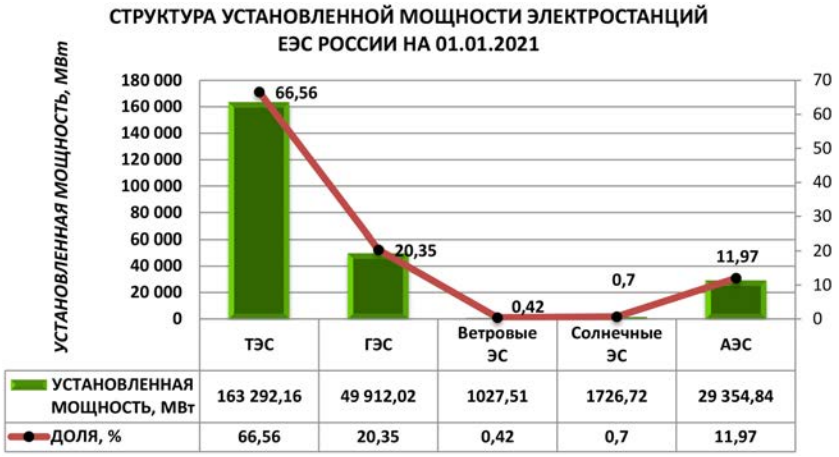


Рис. 3. Структура установленной мощности электростанций ЕЭС России на 01.01.2021, по данным ПАО «Россети»

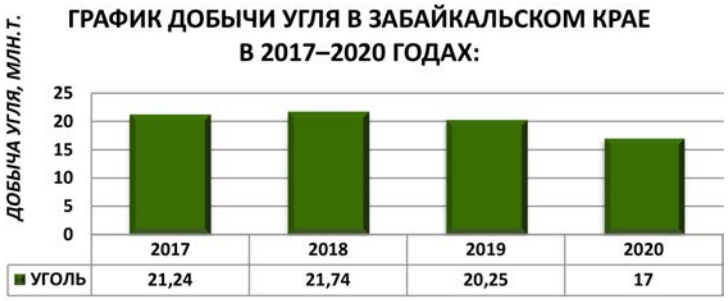


Рис. 4. График добычи угля в Забайкальском крае в 2017–2020 годах, млн. т. (по данным территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Забайкальскому краю)

Рис. 5. Результаты исследования углей на содержание ^{238}U, % на буроугольных месторождениях Забайкалья (2010–2011 гг. Сидорова Г. П.)

Рис. 6. Результаты исследования углей на содержание ЕРН, % на буроугольных месторождениях Забайкалья (2010–2011 гг. Сидорова Г. П.)

вышенным содержанием естественных радионуклидов, применяемый на Уртуйском буроугольном разрезе. Он заключается в определении сорта угля на основе среднего содержания урана по угольному интервалу в пределах каждого горизонта (уступа), составлении на основе этих данных погоризонтных карт качества по радиационным параметрам, сортировкой угля на угольном складе и дальнейшем перемешивании (шихтовании) на штабелях угольного склада. При этом добытые угли комплексного сорта, которые непригодны для использования в угольной генерации энергии, складируются в специально подготовленные отвалы с основанием из ПГС (песчано-гравийной смеси), а сверху обрабатываются специальными пенообразователями для предотвращения попадания внутрь отвала влаги и минимизируют его пыление [10].

Производственная мощность Уртуйского буроугольного разреза составляет 4,5 млн. т. угля в год, что составляет в среднем в разные годы примерно 25 % от общей добычи угля в Забайкальском крае. Детальные исследования Уртуйских углей и анализ геологических условий размещения пластов других буроугольных месторождений Забайкальского края дали основания для проведения исследований на содержание ЕРН в углях этих месторождений (Рис. 5, 6).

Заключение. Из анализа приведенных исследований видно, что методика отработки углей с повышенным содержанием ЕРН, апробированная на Уртуйском буроугольном месторождении, применима как минимум, на Кутинском буроугольном месторождении [11, 12]. Кроме того, остается открытым вопрос использования техногенных месторождений ЕРН, сформированных в результате сжигания углей на Ясногорской ГРЭС и Краснокаменской ТЭЦ, котельной пос. Приаргунск (Кутинский уголь). Из представленных графиков видно что содержание ЕРН в золошлаковых отвалах превышает допустимые концентрации в несколько раз, что, несомненно оказывает негативное воздействие на окружающую среду.

Литература

1. Вызовы углеродного регулирования // Энергетический бюллетень аналитического центра при Правительстве Российской Федерации, 2021. – № 94. – С. 13.
2. Уголь. Особенности и перспективы рынка [Электронный ресурс]. Официальный сайт ООО «Компания Брокеркредитсервис» URL: https://bcs-express.ru/novosti-i-analitika/ugol-osobennosti-i-perspektivy-rynka (дата обращения 13.04.2021).
3. Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 г. (утверждена распоряжением Правительства РФ от 13.06.2020 г. № 1582-р) [Электронный ресурс]. Официальный сайт компании «КонсультантПлюс» – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_355241/ (дата обращения 22.04.2021).
4. Сидорова Г. П. Радионуклиды в углях и продуктах их сжигания / Г. П. Сидорова, Д. А. Крылов // Медицинская радиология и радиационная безопасность, 2016. – Т. 61. – № 2. – С. 75–78.
5. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Уран в углях. – Сыктывкар, 2001. – 48 с.
6. Петров А. И. В сборнике: Проблемы геологии и освоения недр. Труды XVII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 150-летию со дня рождения академика В. А. Обручева и 130-летию академика М. А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы. Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. – С. 592–594.
7. Крылов Д. А. Оценка содержания радиоактивных элементов в углях и продуктах их сжигания / Д. А. Крылов, Г. П. Сидорова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2015. – № 7. – С. 369–376.
8. Добыча угля. Основные показатели [Электронный ресурс]. Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации. URL: https://minenergo.gov.ru/node/435 (дата обращения 28.04.2021).
9. Забайкальский край в цифрах, 2020: Крат.стат.сб. / Забайкалкрайстат – Ч., 2020. – 79 с.
10. Авдеев П. Б. Методы отработки углей с повышенным содержанием естественных радионуклидов / П. Б. Авдеев, Г. П. Сидорова // Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 2016. – № 1. – С. 11–15.
11. Сидорова Г. П. Разработка и обоснование методов контроля качества угля на разрезах Восточного Забайкалья (на примере Уртуйского буроугольного разреза) : специальность 25.00.22 «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сидорова Галина Петровна. – Краснокаменск, 2007. – 158 с.
12. Сидорова Г. П. Обоснование технологических способов управления качеством углей с повышенным содержанием естественных радионуклидов при открытой угледобыче : специальность 25.00.22 «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Сидорова Галина Петровна. – Чита, 2014. – 253 с.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ РАДИОФАРМПРЕПАРАТОВ

Е. А. Маренкова[1], М. С. Кузнецов[1], Н. Р. Неволин[1], В. В. Сохорева[1], С. А. Пластун[1], А. М. Большаков[1], М. С. Черепнёв[1], А. С. Семенов[2], В. М. Малютин[1], В. В. Зукау[1], Д. В. Кабанов[1], Ф. А. Ворошилов[1], А. Б. Капитонов[1], И. В. Безденежных[1]

[1]Томский политехнический университет
Томск, Россия, eam33@tpu.ru, kms@tpu.ru, nrn5@tpu.ru, sokhoreva@tpu.ru, kamikaze@tpu.ru, bolshakov@tpu.ru, maxcherepnev@tpu.ru, mvm@tpu.ru; zukau@tpu.ru, kabanovdv@tpu.ru, fvoroshilov@tpu.ru, abk14@tpu.ru, biv_spm@mail.ru
[2]АО «ТомскНИПИнефть»
Томск, Россия, semenovas@tpu.ru

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CONTROL OF RADIOPHARMACEUTICALS

E. A. Marenkova[1], M. S. Kuznetsov[1], N. R. Nevolin[1], V. V. Sokhorev[1], S. A. Plastun[1], A. M. Bolshakov[1], M. S. Cherepnev[1], A. S. Semenov[2], V. M. Malyutin[1], V. V. Zukau[1], D. V. Kabanov[1], F. A. Voroshilov[1], A. B. Kapitonov[1], I. V. Bezdenezhnykh[1]

[1]TOMSKY Polytechnic University
Tomsk, Russia, eam33@tpu.ru, kms@tpu.ru, nrn5@tpu.ru, sokhoreva@tpu.ru, kamikaze@tpu.ru, bolshakov@tpu.ru, maxcherepnev@tpu.ru, mvm@tpu.ru, zukau@tpu.ru, kabanovdv@tpu.ru, fvoroshilov@tpu.ru, abk14@tpu.ru, biv_spm@mail.ru
[2]AO TomskNIPIneft
Tomsk, Russia, semenovas@tpu.ru

The aim of the study is to draw up a method for monitoring the isotopic composition of medical solutions of radium-223. The possibility of using gamma spectrometry for control of radium-223, its decay products, and its parent isotopes are considered in the work. Gamma-spectrometric analysis of four samples based on radium-223 was performed.

Введение

Широкое применение в настоящее время имеет радионуклидная терапия. Выбор радиофармпрепаратов осуществляется по определенным параметрам, среди которых линейная передача энергии, период полураспада, удельная активность и так далее. Одним из перспективных изотопов для применения в медицинских целях является изотоп радия-223. Радий-223 и его короткоживущие продукты распада испускают последовательно 4 высокоэнергетические альфа-частицы; порядка 93 % образующейся при распадах энергии принадлежит альфа-излучению. Существующий генераторный способ его получения из актиния-227 в настоящее время не удовлетворяет растущий спрос на данный радионуклид из-за чего разрабатываются новые методы получения изотопа радия. Важной задачей контроля качества произведенных радиофармпрепаратов является определение радионуклидной чистоты. Одним из неразрушающих методов контроля изотопного состава медицинских образцов может быть гамма-спектрометрия.

Материалы и методы

В работе рассмотрен качественный анализ четырех образцов на основе радия-223, отличающихся удельной активностью на дату измерения. Измерения проведены на коаксиальном германиевом детекторе Canberra GC1518; анализ спектров выполнен с помощью программного обеспечения Genie-2000. Эксперимент содержит две серии измерений в разное время: 09.12.2020 и 18.12.2020. Живое время набора спектра – 15 минут. Параметры процедур анализа спектров гамма-излучения: допуск при поиске пиков 3 кэВ, пороговый уровень значимости при поиске пиков 2 %.

Результаты и их обсуждение

Практически все рассматриваемые изотопы могут быть идентифицированы посредством гамма-спектрометрического анализа. Первым этапом анализа является идентификация линий, принадлежащих изотопу радия-223 и его продуктам распада. В результате идентификации пиков набранных спектров по библиотеке, содержащей линии гамма-излучения только радия-223 и его продуктов распада, не все пики в спектрах идентифицированы, что свидетельствует о возможном присутствии в растворах примесей.

Для определения возможных примесей в работе рассмотрены методы получения изотопа радия-223: облучение мишеней из природного тория ускоренными протонами [1] и облучение мишеней из радия-226 тепловыми нейтронами [2]. Из облученных

мишеней выделяется изотоп актиния-227, который является генератором радия-223. Схема накопления радия-223:

^{227}Ac (β 98,9 %) → ^{227}Th (α 100 %) → ^{223}Ra.

На состав готового медицинского раствора влияют вид и способ получения мишени, способ накопления изотопа, этап выдержки облученных мишеней, способ выделения изотопа. Однако в большинстве случаев основными примесными изотопами, наличие которых возможно в радиофармпрепарате на основе радия-223, будут являться изотопы радия (радий-224, радий-225, радий-226, радий-228), соответствующие изотопы актиния, продукты распада.

Барий является химическим аналогом радия, из-за чего в растворах после выделения целевого изотопа возможно присутствие микроколичеств изотопа бария-140, образуемого при делении изотопов тория. Основной линией бария-140 является 537,26 кэВ (24,39 %). Данная линия в набранных спектрах не идентифицирована. Отсутствие бария-140 в растворе может свидетельствовать с большей вероятностью о накоплении радия-223 из выделенного актиния-227.

Таким образом, в первую очередь выдвинуто предположение о присутствии в исследуемых образцах материнских изотопов актиния и тория. Актиний-227 характеризуется низкой интенсивностью (менее 1 %) гамма-излучения, что в совокупности с его низкой концентрацией делает невозможным применение гамма-спектрометрии для его прямого контроля. Торий-227 обладает достаточно интенсивной линией гамма-излучений 236 кэВ (12,9 %); однако для регистрации низких концентраций по рассматриваемой линии необходимо значительное увеличение живого времени набора спектра, что может быть осложнено уже высокой величиной времени набора спектра из-за увеличения мертвого времени, что связано с высокой начальной активностью препарата. Определение тория-227 по рентгеновскому излучению малоэффективно: пики рентгеновского излучения расположены в низкоэнергетическом диапазоне (11–19 кэВ), плохо разделимы и практически перекрываются рентгеновским излучением целевого изотопа радия (10–18 кэВ). Мерой контроля материнских для целевого радия изотопа актиния и тория может являться отслеживание изменения количества радия в пробе с течением времени и сравнение с аналитическими расчетами изменения количества радиоизотопа. В период с 09.12.2020 по 18.12.2020 активность радия-223 уменьшилась в 1,6275 раза. Теоретическое изменение активности за рассматриваемый период времени между измерениями составляет 1,7284 раза. Таким образом, можно сделать вывод, что теоретическое уменьшение активности превышает практическое, а значит возможна генерация изотопа радия из примесных материнских изотопов тория-227 и актиния-227. На возможное присутствие в пробе тория-227 указывает наличие его основных гамма-линий в спектре: 235,97 кэВ (12,3 %), 256,25 кэВ (7,0 %), 329,85 кэВ (2,7 %). Однозначно установить содержание тория в пробе по данным пикам невозможно, так как вклад в пик 256,25 кэВ дает линя целевого изотопа радия 255,23 (0,052 %), в 235,97 кэВ – 236,07 кэВ (0,010 %), в 329,85 кэВ – 328,40 кэВ (0,206 %).

В спектре отмечена линия 84 кэВ, которая может быть как линией рентгеновского излучения радия-223 (83,8 кэВ – 25,1 %), так и линией гамма-излучения тория-228. Присутствие тория-228 в рассматриваемых пробах может быть объяснено этапами разделения продуктов облучения. Достоверность идентификации тория-228, рассчитанная программой, достаточно высока (более 0,658), особенно для проб с большей активностью, однако не является гарантом наличия этого изотопа в исследуемых растворах, так как спектр гамма-излучения тория-228 представлен только низкоинтенсивными линиями, максимальная интенсивность характерна для указанной ранее линии 84 кэВ 1,2 %. Из-за возможного наличия тория-228 в пробе в библиотеку для идентификации пиков добавлены продукты его радиоактивного распада. Достоверность идентификации продуктов распада тория-228 достаточно высока: для радия-224 достоверность составляет более 0,979, висмут и свинец идентифицированы не во всех пробах, что может быть объяснено набором низкой статистки из-за малого содержания в исследуемых образцах.

На основании экспериментальных измерений препаратов радия определен план измерений и анализа спектров гамма-излучения для определения изотопной чистоты растворов:

- анализ спектров по библиотеке, содержащей только целевой радий и его продукты распада, определение неидентифицированных пиков;
- проверка неидентифицированных пиков как пики суммирования;
- проверка линии 537,26 кэВ (24,39 %) бария-140;
- анализ спектров по библиотеке, содержащий целевой радий, его материнские и дочерние изотопы, проверка интерферирующих пиков радия-223 и тория-227 по площадям пиков 235,97 кэВ (12,3 %), 256,25 кэВ (7,0 %), 329,85 кэВ (2,7 %);
- проверка пика 84 кэВ тория-228;
- анализ спектров по библиотеке, содержащей радий, его дочерние изотопы и тория-228 с его продуктами распада;
- проверка возможности присутствия других изотопов тория с его продуктами распада.

Заключение

В рамках работы рассмотрена возможность использования гамма-спектрометрического анализа радиофармпрепаратов на основе радия-223 для кон-

троля присутствия изотопов актиния, тория, радия и их продуктов распада. Для более детального анализа состава образцов и корректировки предложенной методики растворов на основе радия-223 необходимо выполнить дополнительные измерения с калибровкой системы по эффективности в выбранной геометрии.

Литература

1. Васильев А. Н. Получение ^{225}Ac и ^{223}Ra из облученного протонами средних энергий природного тория / Васильев А. Н., Остапенко В. С., Ермолаев С. В., Лапшина Е. В., Калмыков С. Н. // Физикохимия, 2015. – 2015. – С. 90–91.
2. Кузнецов Р. А. Получение альфа-излучающих нуклидов облучением ^{226}Ra в высокопоточном реакторе см / Кузнецов Р. А., Буткалюк П. С., Буткалюк И. Л., Тарасов В. А., Романов Е. Г., Баранов А. Ю. // Сборник трудов АО ГНЦ НИИАР, 2015. – № 1. – С. 23–30.

МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ ПОТЕНЦИАЛ УРАНА

Г. А. Машковцев[1], А. В. Бойцов[2], С. В. Полонянкина[3], А. В. Тарханов[4]

[1]Всероссийский институт минерального сырья, ФГБУ «ВИМС»
Москва, Россия, mashkovcev@vims-geo.ru, vims@vims-geo.ru
[2]АО «Техснабэкспорт»
Москва, Россия, tenex@tenex.ru
[3]АО «АРМЗ»
Москва, Россия, svpolonyankina@armz.ru, info@armz.ru
[4]АО «ВНИИХТ»
Москва, Россия, tarkhanov.uranium@mail.ru, info@vniiht.ru

URANIUM MINERAL AND RAW POTENTIAL

G. A. Mashkovtsev[1], A. V. Boytsov[2], S. V. Polonyankina[3], A. V. Tarkhanov[4]

[1]All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N. M. Fedorovsky (FSBI VIMS)
Moscow, Russia, mashkovcev@vims-geo.ru
[2]JSC "Techsnabexport"
Moscow, Russia, tenex@tenex.ru
[3]Atomredmetzoloto Uranium Holding Co. (ARMZ JSC)
Moscow, Russia, svpolonyankina@armz.ru, info@armz.ru
[4]JSC "VNIIHT"
Moscow, Russia, tarkhanov.uranium@mail.ru, info@vniiht.ru

The growth of nuclear power plant capacities predicted for the coming years around the world and in the Russian Federation makes it necessary to increase the production of natural uranium, as well as to intensify uranium exploration aimed at the discovery of new high-quality deposits. In this regard, various aspects of increasing the uranium mineral resource base in Russia and abroad are considered.

Основные тенденции развития мировой урановой промышленности

Всемирная Ядерная Ассоциация в аналитическом отчете по ядерному топливному циклу 2019 года сделала оптимистичные прогнозы по развитию мировой атомной энергетики. Базовый сценарий предполагает, что мощность АЭС во всем мире вырастет с нынешних 370 ГВт до почти 570 ГВт к 2040 году, то есть более чем в полтора раза. Пропорционально должны увеличиться и потребности АЭ в уране с 67 до 100 тыс. тонн в год. Доля вторичных источников снизится более чем в три раза, а основной рост должен быть обеспечен первичной добычей природного урана, который не имеет альтернативы на этом горизонте. Добыча урана должна увеличиться с нынешних 53 до 92 тыс. тонн к 2040 году, причем на действующих рудниках она сократится на треть, а планируемые новые рудники не смогут компенсировать выбывающие мощности. С 2025 года спрос на уран начнет превышать предложение, и дефицит придется покрывать из так называемых неопределённых источников в объеме до 46 тыс. т к 2040 году.

Несмотря на глобальные вызовы, урановый рынок продолжает лихорадить, а низкие цены на уран никак не отвечают ожиданиям производителей, многие из которых сдерживают или вовсе закрывают добывающие мощности. Спотовые цены на уран в по-

следние пять лет находятся в пределах 25–30 долл. за фунт. Как следствие, значительно сокращаются инвестиции в геологоразведку как со стороны ведущих производителей, так и многочисленных компаний-юниоров. Кроме цены на уран, на реализацию планов производителей урана влияют политические, социальные, экологические, технологические, технические факторы.

Производство урана

Общая тенденция роста производства урана сохранялась до 2016 года, когда оно выросло более чем в полтора раза за 10 лет и достигло абсолютного максимума в 63 тыс. т. Неблагоприятная рыночная конъюнктура привела к последующему резкому снижению добычи урана на 25 % – до 47,6 тыс. т в прошедшем 2020 году. Всего с 2013 года законсервировано 15 урановых рудников с суммарной мощностью 15 тыс. т. Даже мировой лидер Казахстан, обладающий самой высокорентабельной сырьевой базой и продемонстрировавший шестикратный рост добычи урана за 10 лет, вынужден был сократить производство с 24,7 до 19,5 тыс. т. Канада, державшая лидерство в 1990–2000-х годах, снизила в этот период добычу с 14 до 4 тыс. т. Приостановлена работа крупнейшего в мире рудника Сигар Лейк, который совсем недавно производил 7 тыс. т. Все это привело к тому, что после более чем десятилетнего периода избыточного предложения урана на рынке, баланс начинается выравниваться.

В современных условиях выживают компании с низкой себестоимостью добычи и с выгодными долгосрочными контрактами. Среди компаний- производителей урана Казатомпром прочно удерживает лидерство с 24 % от общемировой добычи урана в последние годы. Росатом (Атомредметзолото и Uranium One) в 2019 году вышел на второе место и удерживает его с долей 14–15 %, преследуемый китайскими компаниями CGN и CNNC.

Основным способом добычи уран с 2010 года стало скважинное подземное выщелачивание. С 2004 по 2015 гг. добыча методом СПВ увеличилась почти в 4 раза: с 20 % в 2005 г. до 50 % в 2014 г. С 2018 года более половины всего урана добывается методом СПВ, и более 40 % – в Казахстане. В мире сегодня работают 36 урановых рудников, из которых лишь 20 имеют общую себестоимость производства ниже среднегодовой спотовой цены на уран, причем 18 из них добывают уран методом СПВ и 16 расположены в Казахстане. Мощность рудников СПВ составляет половину от всех добывающих мощностей, а их запасы – 45 % от общих разведанных запасов. Сегодня – эра рудников СПВ и Казахстана, но в перспективе, при оценке новых планируемых рудников, доля мощностей СПВ сокращается до 11 %, а относящихся к ним ресурсов – до 8 %.

Мировая минерально-сырьевая база урана

Срок отработки любого месторождения конечен, поэтому ключевым фактором устойчивого развития добычи урана является качественная сырьевая база. Согласно так называемой Красной Книге по урану МАГАТЭ-ОЭСР 2020 года, общий объем всех разведанных ресурсов составляет около 8 млн тонн и вполне достаточен для обеспечения будущих долгосрочных потребностей на следующие 50 лет. Вместе с тем, ресурсы низкой стоимостной категории менее 80 долл./кг, являющиеся основой для планирования производства добывающих компаний, неуклонно сокращаются и составляют около четверти от всех ресурсов. Большая часть мировой ресурсной базы слабо разведана и относится к высоким стоимостным категориям. Учитывая, что период от начала поисков до освоения месторождения составляет не менее 10 лет, чрезвычайно актуальной становится активизация урановой геологоразведки, нацеленной на открытие новых высококачественных месторождений.

Минерально-сырьевая база урана России

МСБ урана РФ составляет 713 тыс. т, в распределенном фонде, которым владеет АО АРМЗ Росатома, содержится 511 тыс. т. Основная часть запасов урана принадлежит месторождениям двух геолого-промышленных типов – жильно-штокверковому в древних разломах и в вулкано-тектонических структурах (ВТС) и песчаниковому в палеодолинах, небольшая доля связана с комплексным редкометальным типом.

Половина запасов сосредоточена в золото-урановых месторождениях Эльконского района (Республика Саха (Якутия)). Однако среднее содержание металла в рудах низкое (0,15 %), а верхняя кромка рудных зон, контролируемых древними активизированными разломами, располагается на глубинах 400 и более метров, что в совокупности с низким качеством оруденения определяет высокую себестоимость получения товарной продукции и нерентабельность разработки месторождений при современной конъюнктуре уранового сырья.

В Юго-Западном Забайкалье располагается крупный Приаргунский урановорудный район, осваиваемый более 40 лет. В Стрельцовском рудном поле (СРП), приуроченном к одноименной кальдере, первоначально было сосредоточено около 260 тыс. т урана со средним содержанием 0,26 %. К настоящему времени МСБ СРП составляет около 100 тыс. т при существенно сниженном качестве урановых руд (0,14–0,15 %), не обеспечивающем рентабельной отработки запасов отдельных, наиболее истощенных месторождений. Положение будет улучшено вовле-

чением в эксплуатацию подготавливаемого крупного месторождения Аргунское с более высокими содержаниями урана в рудах – 0,22 %.

Наиболее экономически эффективные для освоения месторождения в палеорусловых песчаниках сосредоточены в двух разрабатываемых районах – Витимском (Республика Бурятия) и Зауральском (Курганская обл.). Витимский район располагает системой неглубоко залегающих неогеновых палеодолин, перекрытых платобазальтами. Общие запасы урана составляют 46 тыс. т, со средним содержанием металла 0,045 %. Добыча осуществляется скважинным подземным выщелачиванием с годовой производительностью около 1 тыс. т, которая будет поддерживаться на этих запасах более 40 лет. Зауральский район располагает тремя месторождениями в глубоко залегающих юрских палеодолинах – Далматовским, Хохловским и Добровольным, с общими запасами урана 14 тыс. т и $С_{ср.}$ 0,044 %. Далматовское месторождение практически отработано, Хохловское находится в состоянии активного освоения, а Добровольное подготавливается к эксплуатации.

Нераспределенный фонд недр включает несколько урановых объектов с суммарными запасами более 200 тыс. т, в том числе крупное комплексное редкометальное Улуг-Танзекское месторождение (104 тыс. т U), в рудах которого содержания урана в среднем не превышают 0,01 %. Этот, а также остальные объекты нераспределенного фонда по комплексу негативных особенностей в настоящее время неприемлемы для экономически выгодной эксплуатации. Рентабельными для разработки являются не более 10 % запасов урана в осваиваемых урановорудных районах, которые могут обеспечить суммарное производство сырья на уровне 3 тыс. т металла до 2040–2045 гг. Надежной минерально-сырьевой базой добычной деятельности на долгосрочный период должны явиться новые месторождения, которые могут быть выявлены в результате реализации прогнозного уранового потенциала.

К настоящему времени прогнозные ресурсы урана РФ составляют: $Р_1$ – 165 тыс. т, $Р_2$ – 515 тыс. т, $Р_3$ – 1634 тыс. т. Перспективы прироста запасов за счет оценки наиболее достоверных категорий прогнозных ресурсов $Р_1$ и $Р_2$ в пересчете на $С_{2усл.}$ будут насчитывать 150–170 тыс. т. Наиболее надежные объекты с локализованными прогнозными ресурсами $Р_1$ и $Р_2$ связаны с палеодолинами Витимского района. Имеются также перспективы выявления новых месторождений в ВТС и в древних структурно-стратиграфических несогласиях (ССН). В первую очередь заслуживают проведения поисков богатого жильного оруденения перспективные, но слабо изученные фланги СРП, для чего разработан проект геологоразведочных работ «Кальдера». Положительный результат его реализации позволит в существенной мере расширить ресурсный потенциал рудного поля, а главное, улучшить качественные показатели запасов урана в целом. Кроме того, на территории Забайкалья и Дальнего Востока имеется ряд вулкано-тектонических структур, в т. ч. с установленной урагоносностью, которые по существу являются потенциальными урановорудными районами (ПУРР) и потенциальными урановорудными узлами (ПУРУ). Другим важным геолого-промышленным типом ожидаемых объектов являются месторождения типа «несогласия», хорошо зарекомендовавшие себя как источники высококачественных руд в Канаде и в Австралии. В Сибирском регионе установлен ряд рудопроявлений и мелких месторождений этого типа, районы локализации которых требуют постановки и проведения поисковых и оценочных работ. Таким образом, реализация всего комплекса геологоразведочных работ на уран в течение 10–15 лет позволит в существенной мере компенсировать убыль погашаемых за этот период запасов уранового сырья и подготовить новые объекты для эффективного производства металла на долгосрочную перспективу.

Зарубежная минерально-сырьевая база и добыча урана ГК Росатом

С целью гарантированного долгосрочного сырьевого обеспечения потребностей в уране предприятий ядерного топливного цикла, Росатом в 2010 году приобрел канадскую компанию Ураниум Уан и консолидировал на ее основе высокоэффективные активы в ключевых «урановых» регионах мира. Проекты Ураниум Уан диверсифицированы как географически на трех континентах, так и по всему производственному циклу: геологоразведка, проектирование, строительство рудников и добыча.

За прошедшие десять лет производство Ураниум Уан выросло в 5 раз, достигнув максимума 5102 т в 2017 году. Дальнейший рост сдерживался негативным урановым рынком и, как следствие, производство снизилось до 4276 т в 2020 году. Несмотря на это, компания вышла в 2020 году на третье место в мире по добыче среди урановых компаний.

Разведанная сырьевая база и планируемые производственные мощности способны обеспечить дальнейший рост при благоприятных рыночных ценах. Сырьевая база компании составляет более 200 тыс. т, из которых более 112 тыс. т – разведанные запасы действующих СП в Казахстане с низкой себестоимостью добычи.

С целью восполнения и развития сырьевой базы Ураниум Уан осуществляет геологоразведку как в уже определившихся урановорудных районах и в зонах своего присутствия, так и в новых странах.

Месторождение Мкуджу Ривер в Танзании находится в высокой степени готовности к отработке карьером при цене более 50 долл./фунт. Это одно из крупнейших в мире урановых месторождений с ресурсной базой 58500 т урана. Проект освоения карьерным способом с производительностью свыше

3 тыс. т урана в год был разработан в 2013 году, а в 2017 году законсервирован в связи с низкими ценами на уран. Перспективы оптимизации проекта связаны с возможностью применения СПВ. Натурные опыты 2013 и 2016 годов подтвердили возможность отработки части запасов урана методом скважинного подземного выщелачивания.

Геологоразведочный проект «Крылья» в Намибии нацелен на разведку и освоение методом СПВ крупного уранового месторождения урана. В результате геологоразведочных работ 2019 года произведена оценка ресурсов месторождения по категории Inferred в количестве более 50 тыс. т. По геологическим характеристикам месторождение схоже с казахстанскими урановыми месторождениями и потенциально пригодно для отработки методом СПВ.

Таким образом, имеющаяся отечественная МСБ урана, осваиваемые и планируемые к разработке в интересах РФ зарубежные объекты, а также вновь выявленные в ходе проектируемых ГРР в перспективных районах Сибири и Дальнего Востока объекты позволят существенно укрепить минерально-сырьевой потенциал страны и обеспечить на долгосрочную перспективу производство в необходимых объемах атомного сырья.

РАДИОНУКЛИДЫ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ ЗАПАДНЫХ РАЙОНОВ ТУРГАЙСКОГО ПРОГИБА

Н. А. Медешова[1], Д. А. Новиков[2,3], А. А. Максимова[2], А. С. Деркачев[2]

[1]Satbayev University
Алматы, Казахстан, nazy_94@mail.ru
[2]Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН
Новосибирск, Россия, NovikovDA@ipgg.sbras.ru
[3]Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

RADIONUCLIDES IN THE NATURAL WATERS OF WESTERN REGIONS OF TURAN TROUGH

N. A. Medeshova[1], D. A. Novikov[2,3], A. A. Maksimova[2], A. S. Derkachev[2]

[1]Satbayev University
Almaty, Kazakhstan, nazy_94@mail.ru
[2]Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS
Novosibirsk, Russia, NovikovDA@ipgg.sbras.ru
[3]Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russia

The result of the uranium and radon content in the natural waters of nine exploration areas within western regions of Turan trough are presented. In the studied natural waters, a wide variety of waters in terms of chemical composition and the value of total mineralization from ultrafresh to saline (84–28375 mg/dm^3) has been established. The waters of HCO_3–Cl Ca–Mg–Na, SO_4–HCO_3–Cl Na–Ca–Mg, SO_4–HCO_3–Cl Mg–Ca–Na и SO_4–Cl–HCO_3 Ca–Mg–Na composition predominate. The value of pH varies from slightly acidic to slightly alkaline (5.2–8.2). ^{238}U content varies from $9.5 \cdot 10^{-5}$ to 0.12 mg/dm^3. Radon concentration varies from 9 to 363 Bq/l.

Введение

Несмотря на то, что первые сведения по особенностям геологического строения Тургайского прогиба были получены еще во второй половине XVIII века - работы академиков И. Г. Гмелина и П. С. Палласа, гидрогеологические исследования начали проводить с первой половины XIX века, а гидрогеохимические еще позднее. Результаты гидрогеохимических исследований приведены в работах У. Ф. Ахмедсафина, А. С. Салимбаева, Г. М Тетерева, А. П. Тюрина, А. Т Неумывакина, Ф. К. Кабиева, А. В Козлова, Б. Е. Шаркенова, В. Д. Шевлякова, В. К. Дейнека и др. [7–10, 12, 14, 17].

Гидрогеохимические методы поисков полезных ископаемых широко применяются в практике поисковых работ. Особое внимание в исследованиях уделяется радионуклидному составу природных вод рудопроявлений. Из последних работ этого направления следует упомянуть следующие [1–6, 13, 15–16]. В этой связи в настоящей работе впервые выполнено обобщение данных по геохимическим особенностям природных вод девяти поисковых площадей на по-

лиметаллические полезные ископаемые в пределах западных районов Тургайского прогиба Республики Казахстан (рис. 1).

Результаты и их обсуждение

Особенности геологического строения

Согласно современным представлением Тургайский прогиб выделяется в самостоятельную структуру, имеющую двухъярусное строение: нижний ярус – складчатый сложно построенный палеозойский фундамент; верхний – почти горизонтально залегающий мезозойско – кайнозойский покров.

В составе палеозойского складчатого фундамента выделяется три структурных комплекса: допалеозойский, нижнепалеозойский и средне-верхнепалеозойский. Фундамент залегает на глубинах от 150–200 м в центральной части области, до 250–800 м в северной и южной частях. В западном направлении происходит поднятие фундамента, уменьшение мощности осадочных пород и на границе области палеозойские и протерозойские по-

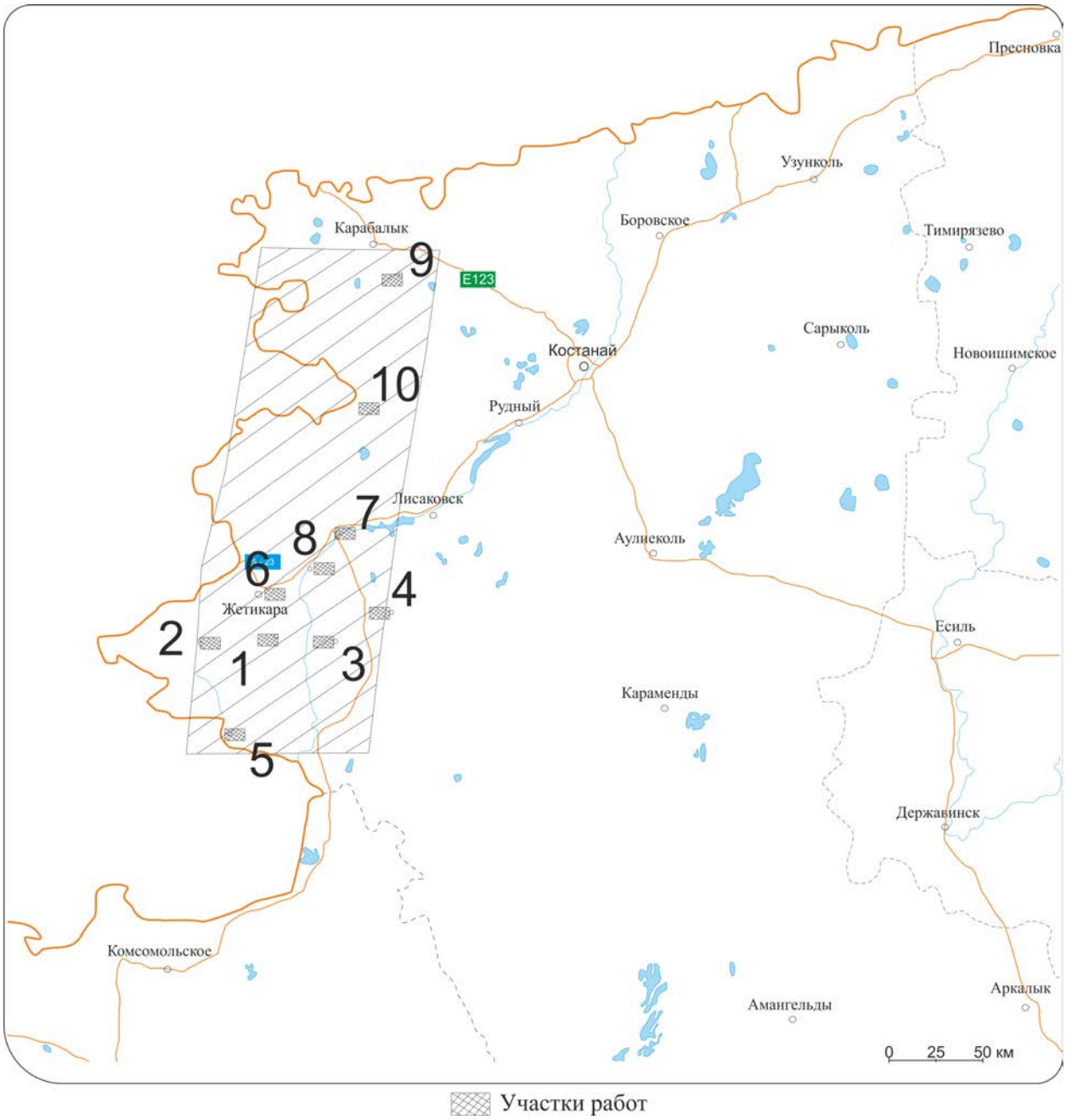


Рис. 1. Местоположение изученных площадей

Участки работ: 1 – Милютинский; 2 – Шевченовский; 3 – Камышинский; 4 – Краснооктябрьский; 5 – Аккаргинский; 6 – Жетигаринский; 7 – Денисовский; 8 – Шекубаевский; 9 – Смирновский; 10 – Варваринский.

роды выходят на поверхность. Здесь они перекрыты тонким слоем четвертичных суглинков и останцами среднеолигоценовых отложений.

Допалеозойские породы представлены сильно метаморфизованными гнейсами, мигматитами, амфиболитами и кристаллическими сланцами. Древние толщи собраны в изоклинальные, веерообразные, часто опрокинутые складки.

Нижнепалеозойский структурный ярус сложен различными метаморфическими сланцами, филлитами, кварцитами и рассланцованными эффузивами. Метаморфические образования прорваны разнообразными по составу и возрасту интрузиями.

В строении средне-верхнепалеозойского структурного комплекса принимают участие породы силура, девона, карбона и перми, представленные интрузивными телами и дислоцированными осадочно- вулканическими образованиями: известняками, алевролитами, песчаниками, спилитами, диабазами, порфиритами, туфами и туфобрекчиями.

Нижняя часть разреза мезозойско-кайнозойского покрова сложена дислоцированными осадочно-эффузивными породами триаса и песчаноглинистыми отложениями юры, которые сохранились лишь в наиболее глубоких депрессиях складчатого фундамента. Средняя часть разреза мощностью до 500 м сложена морскими песчано-глинистыми осадками верхнего мела, нижнего и среднего палеогена. Морскими песчано-глинистыми осадками верхнего пела, нижнего и среднего палеогена.

Верхняя часть разреза выполнена континентальными отложениями верхнего палеогена, неогена, антропогена.

В Тургайском прогибе открыты крупные месторождения магнетитовых железных руд (Качарское, Соколовское, Куржункольское) и фосфоритистых бурых железняков (Лисаковское, Аятское). Все месторождения редких, благородных и большинство цветных металлов приурочены к палеозойским породам Мугоджар и фундамента прогиба. В чехле Тургайского прогиба известны месторождения бокситов (Краснооктябрьское, Коктальское, Наурзумское и др.) и свинцово-цинковых руд в карсте (Шаймерден). В общей сложности имеется рудных объектов: медь, свинец, цинк – около 200 объектов, редкие и редкоземельные – около 122 и золота – около 60. Кроме того, разведаны запасы угля (Тургайский угольный бассейн) [11].

Геохимические особенности

Воды изученных поисковых площадей сильно отличаются по химическому составу и величине общей минерализации. В первую очередь проявления соленых вод (более 10 г/дм^3) обязаны своим происхождением процессам континентального засоления, учитывая нахождение исследуемого района в аридном климате. В целом, доминируют воды HCO_3–Cl Ca–Mg–Na, SO_4–HCO_3–Cl Na–Ca–Mg, SO_4–HCO_3–Cl Mg–Ca–Na и SO_4–Cl–HCO_3 Ca–Mg–Na состава. Они характеризуются pH от слабокислых до слабощелочных (5,2–8,2). Концентрации ^{238}U составляют от 9,5 • 10^{-5} до 0,12 мг/дм^3. Активность ^{222}Rn изменяется в диапазоне от 9 до 363 Бк/дм^3 (рис. 2). Кратко рассмотрим распределение радионуклидов по изученным площадям.

Воды Милютинского проявления характеризуются преимущественно HCO_3–Cl Ca–Mg–Na и Cl Ca–Mg–Na составом с величиной общей минерализации 341–22427 мг/дм^3. Они харакетризуются pH от нейтральных до слабощелочных (6,5–8,0) с активностью ^{222}Rn 69–150 Бк/дм^3 и концентрациями ^{238}U 0,0002–0,036 мг/дм^3. Природные воды Шевченковского проявления характеризуются преимущественно SO_4–HCO_3–Cl Ca–Mg–Na составом с величиной общей минерализации 263–14581 мг/дм^3. Они от слабокислых до слабощелочных с величиной pH 6,2–8,1. Активность ^{222}Rn составляет 13–40 Бк/дм^3, а содержания ^{238}U находятся в интервале 0,00015–0,085 мг/дм^3. Воды Камышинского проявления отличаются преимущественно SO_4–HCO_3–Cl Na–Mg–Ca и HCO_3–Cl Ca–Mg–Na составом с величиной общей минерализации 262–28374 мг/дм^3. Они нейтральные – слабощелочные (pH 7,0–8,1) с содержанием ^{238}U 0,00041–0,0078 мг/дм^3. Воды Краснооктябрьского проявления относятся преимущественно к HCO_3–Cl Mg–Ca–Na и HCO_3–Cl Ca–Mg–Na типам с величиной

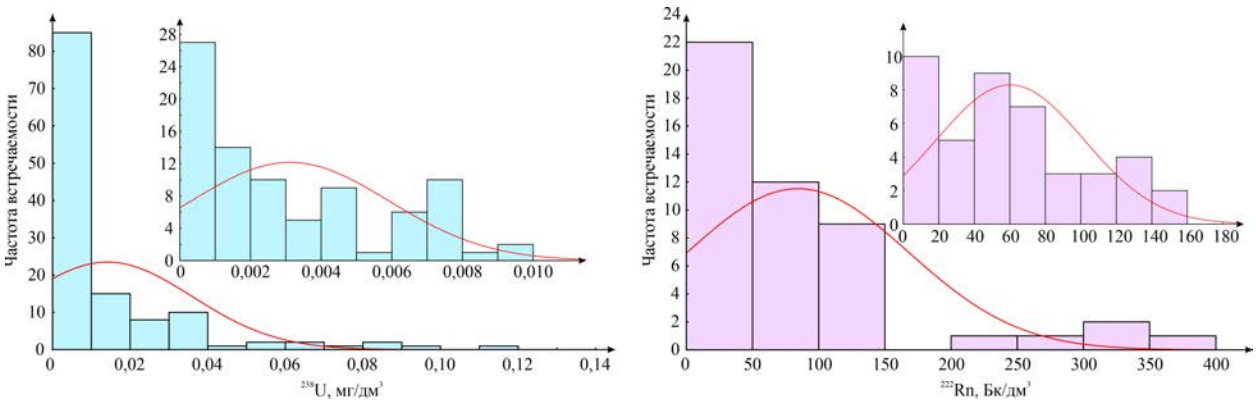


Рис. 2. Распределение урана и радона в природных водах западных районах Тургайского прогиба

общей минерализации 84–21075 мг/дм³. Они нейтральные – слабощелочные (pH 6,8–8,0) с активностью ^{222}Rn 46–261 Бк/дм³ и содержанием ^{238}U 0,0045 мг/дм³. Воды Аккаргинского проявления характеризуются преимущественно SO_4–Cl Ca–Mg–Na составом с величиной общей минерализации 467–10797 мг/дм³. Они нейтральные – слабощелочные (pH 7,0–7,7) с активностью ^{222}Rn 54–121 Бк/дм³ и содержанием ^{238}U 0,0029–0,0113 мг/дм³. Воды Шекубаевского проявления характеризуются преимущественно SO_4–HCO_3–Cl Na–Ca–Mg составом с величиной общей минерализации 366–1629 мг/дм³. Они нейтральные – слабощелочные (pH 6,5–7,6) с активностью ^{222}Rn 28 Бк/дм³ и содержанием ^{238}U 0,00026–0,00061 мг/дм³. Воды Денисовского проявления характеризуются преимущественно SO_4–Cl–HCO_3 Ca–Mg–Na составом с величиной общей минерализации 303–2007 мг/дм³. Они нейтральные – слабощелочные (pH 7,1–8,2) с активностью ^{222}Rn 11–363 Бк/дм³ и содержанием ^{238}U 0,00052–0,016 мг/дм³. Воды Смирновского проявления характеризуются преимущественно SO_4–HCO_3–Cl Mg–Ca–Na и SO_4–Cl–HCO_3 Ca–Mg–Na составом с величиной общей минерализации 152–12917 мг/дм³. Они слабокислые – слабощелочные (pH 5,2–8,2) с активностью ^{222}Rn 28 Бк/дм³ и концентрациями ^{238}U 0,00026–0,00061 мг/дм³. Воды Варваринского проявления характеризуются преимущественно SO_4–HCO_3–Cl Mg–Ca–Na и Cl–SO_4–HCO_3 Na–Mg–Ca составом с величиной общей минерализации 168–2792 мг/дм³. Они слабокислые – нейтральные (pH 5,4–7,3) с активностью ^{222}Rn 54–108 Бк/дм³ и содержанием ^{238}U 0,00065–0,0078 мг/дм³. Выполненный в первом приближении анализ распределения радионуклидов требует дополнительных исследований состава вмещающих пород и выделения однородных геохимических совокупностей.

Заключение

Резюмируя это краткое сообщение отметим, что в работе представлены результаты первого обобщения гидрогеохимических данных, полученных за длительный период времени поисковых работ на полиметаллическое сырье в Тургайском прогибе. Установлено широкое разнообразие вод по химическому составу и величине общей минерализации от ультрапресных до соленых (84–28375 мг/дм³). Преобладают воды HCO_3–Cl Ca–Mg–Na, SO_4–HCO_3–Cl Na–Ca–Mg, SO_4–HCO_3–Cl Mg–Ca–Na и SO_4–Cl–HCO_3 Ca–Mg–Na состава. Они характеризуются pH от слабокислых (5,2) до слабощелочных (8,2). Концентрации ^{238}U варьируют в очень широких пределах от $9{,}5 \cdot 10^{-5}$ до 0,12 мг/дм³. Активность ^{222}Rn изменяется в диапазоне от 9 до 363 Бк/дм³. Максимальная активность радона в природных водах хорошо трассирует интрузивные образования, поскольку радон не может далеко мигрировать от источника эманации. Концентрации урана более 0,1 мг/дм³ говорят о возможном наличии редкоземельной ториевой минерализации во вмещающих породах Смирновской поисковой площади.

Исследования проводились при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025, РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-45-540004.

Литература

1. De Caritat P. Groundwater composition near the nickel-copper smelting industry on the Kola Peninsula, central Barents Region (NW Russia and NE Norway) / De Caritat P., Danilova S., Jaeger Ø., Reimann C., Storrø G. // Journal of Hydrology, 1998. – V. 208. – P. 92–107.
2. Grosboisa C. Deconvolution of trace element (As, Cr, Mo, Th, U) sources and pathways to surface waters of a gold mining-influenced watershed / Grosboisa C., Schäfer J., Bril H., Blanc G., Bossy A. // Science of the total environment, 2009. – V. 407. – P. 2063–2076.
3. Ivanova K. Radiological impact of surface water and sediment near uranium mining sites / Ivanova K., Stojanovska Z., Badulin V., Kunovska B., Yovcheva M. // Journal of Radiological Protection, 2015. – V. 35. – P. 819–834.
4. Manjón G. Some naturally occurring radionuclides (NORM) in a river affected by acid mining drainages / Manjón G., Mantero J., Vioque I., Galván J., Díaz-Francés I., García-Tenorio R. // Chemosphere, 2019. – V. 223. – P. 536–543.
5. Mishra S. Estimation of distribution coefficient of natural radionuclides in soil around uranium mines and its effect with ionic strength of water / Mishra S., Maity S., Pandit G. G. // Radiation Protection Dosimetry, 2012. – V. 152. – № 1–3. – P. 229–233.
6. Yamamoto M. Uranium in acidic mine drainage at the former Ogoya Mine in Ishikawa Prefecture of Japan / Yamamoto M., Sakaguchi A., Kofuji H. // J. Radioanal Nucl Chem., 2010. – V. 283. – P. 699–705.
7. Ахмедсафин У. М. Гидродинамические области низменных равнин и плато. Тургайская столовая равнина / Ахмедсафин У. М., Курмангалиев Р. М., Симоненко В. Г. // Зональность подземных вод Казахстана. – Алма-Ата: Наука, 1981. – С. 100–111.
8. Ахмедсафин У. М. Происхождение и формирование ресурсов подземных вод в аридных районах Казахстана // Проблемы гидрогеологии Казахстана. – Алма-Ата: Наука, 1974. – С. 3–15.
9. Владимиров Н. М. Подземные воды континентального олигоцена Тургайской впадины и Северного Казахстана / Владимиров Н. М., Сыды-

ков Ж. С., Мухамеджанов С. М. // Тр. Казахского горнометаллургического ин-та, 1959. – № 18. – С. 45–52.
10. Гармонов И. В. Подземные воды юга Западно-Сибирской низменности и условия их формирования / Гармонов И. В., Иванов А. В. – Москва: Изд-во АН СССР, 1961. 122 с.
11. Геология СССР. Том XXIV. Турайский прогиб. Полезные ископаемые / Гл. редактор А. В. Сидоренко. – Москва: Издательство «Недра», 1975. – 304 с.
12. Гидрогеология СССР. Том XXXIII. Северный Казахстан. Гл. редактор А.В. Сидоренко. – Москва: Издательство «Недра», 1966. – 355 с.
13. Гречухин М. Н. Новое гидрогенное месторождение урана Ульзит в Монголии / Гречухин М. Н., Игнатов П. А. // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, 2014. – № 4. – С. 27–33.
14. Кабиев Ф. К. Подземные воды. Западно-Сибирский район. // Формирование и ресурсы подземных вод меловых отложений Западного и Северного Казахстана. – Алма-Ата: Наука, 1976. – С. 72–95.
15. Конышев А. А. Особенности поведения химических элементов в системе вода-порода района разрабатываемого карьера бутового камня в Питкярантском рудном районе (Карелия) / Конышев А. А., Сидкина Е. С., Солдатова Е. А., Догадкин Д. Н., Громяк И. Н. // Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 7–19.
16. Мальковский В. И. Анализ коллоидных форм переноса урана подземными водами на U–Mo-месторождениях Стрельцовского рудного поля (Восточное Забайкалье) / Мальковский В. И., Петров В. А., Диков Ю. П., Александрова Е. В., Бычкова Я. В., Мохов А. В., Шулик Л. С. // Доклады академии наук, 2014. – Т. 454. – № 1. – С. 81–83.
17. Шаркенов Б. Е. Гидрохимические условия и особенности формирования химического состава грунтовых вод юго-восточной части Тургайской впадины: автореф. дис. … канд. геол.-минер. наук. – Ленинград, 1970. – 26 с.

ЭПР-СПЕКТРОМЕТРИЯ ГАММА-ОБЛУЧЕННОГО САХАРА

И. М. Меджидов, О. В. Тхорик, В. А. Харламов, Т. В. Чиж, И. В. Полякова

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
Обнинск, Россия, immedzhidov@mail.ru

EPR SPECTROMETRY OF GAMMA-IRRADIATED SUGAR

I. M. Medzhidov, O. V. Tkhorik, V. A. Kharlamov, T. V. Chizh, I. V. Polyakova

Russian Institute of Radiology and Agroecology
Obninsk, Russia, immedzhidov@mail.ru

In this study, sugar samples were irradiated at various doses. EPR-spectrometry of the irradiated sugar samples was performed and a «Dose/Intensity» calibration curve was plotted. Re-spectrometry of the samples was carried out 30 and 60 days after the irradiation process.

Введение

Обеспечение безопасности сельскохозяйственной продукции является важной общемировой задачей. Один из методов, который используется для выполнения данной задачи – обработка сельскохозяйственной продукции ионизирующим и неионизирующим излучением. Наиболее актуальным методом, позволяющим идентифицировать факт облучения пищевой продукции является ЭПР-спектрометрия, основанная на явлении резонансного поглощения электромагнитного излучения парамагнитным веществом. Применение данного метода регламентируется нормативными документами ГОСТ 31652-2012, ГОСТ 31672-2012.

Сахар считается одним из лучших материалов для ЭПР-спектрометрии. Преимущества данного материала в том, что в ходе облучения образуются стабильные свободные радикалы и отсутствует фоновый сигнал при ЭПР-спектрометрии. Многие авторы рекомендуют использовать сахар в качестве регистрационного дозиметра во время радиационно-чрезвычайных ситуаций и при проведении клинических операций с использованием ионизирующего излучения, т. к. радиационно-индуцированный сигнал сахара стабилен в течение длительного времени после облучения. Согласно проведенным исследованиям авторов Yordanov и Georgieva [1], ЭПР-сигнал изменяется только в первые часы после облучения. Различия между сигналами зарегистрированы в следую-

щих этапах регистрации: 5, 120, 360 минут и 25 часов. После 25-ти часов ЭПР-сигнал остается стабильным в течение 11-ти месяцев. Nakajima и Otsuki [2] исследовали ЭПР-сигнал облученного сахара, хранившегося в течение недели после облучения при комнатной температуре, и не обнаружили изменений в сигнале за данный период времени. Также авторы провели исследование, где образцы сахара подвергались нагреву при температуре 55 °C в течение 18-ти часов и не заметили понижения количества свободных радикалов. Fattibene et al. [3] также исследовали временную зависимость интенсивности ЭПР-сигнала сахара. Образцы сахара были облучены в диапазоне доз от 1 до 1000 сГр источником ^{60}Co. Изменение сигналов было обнаружено только в первые 100 часов после процесса облучения, а в дальнейшем изменений не наблюдалось.

В последние несколько десятилетий было продемонстрировано, что сахар является очень перспективным материалом для дозиметрических целей как в радиационной безопасности, так и в ядерной медицине. Исследование временной стабильности ЭПР-сигнала является актуальной задачей, т. к. уменьшение интенсивности сигнала с течением времени приводит к затруднению идентификации факта облучения и оценки поглощенной дозы.

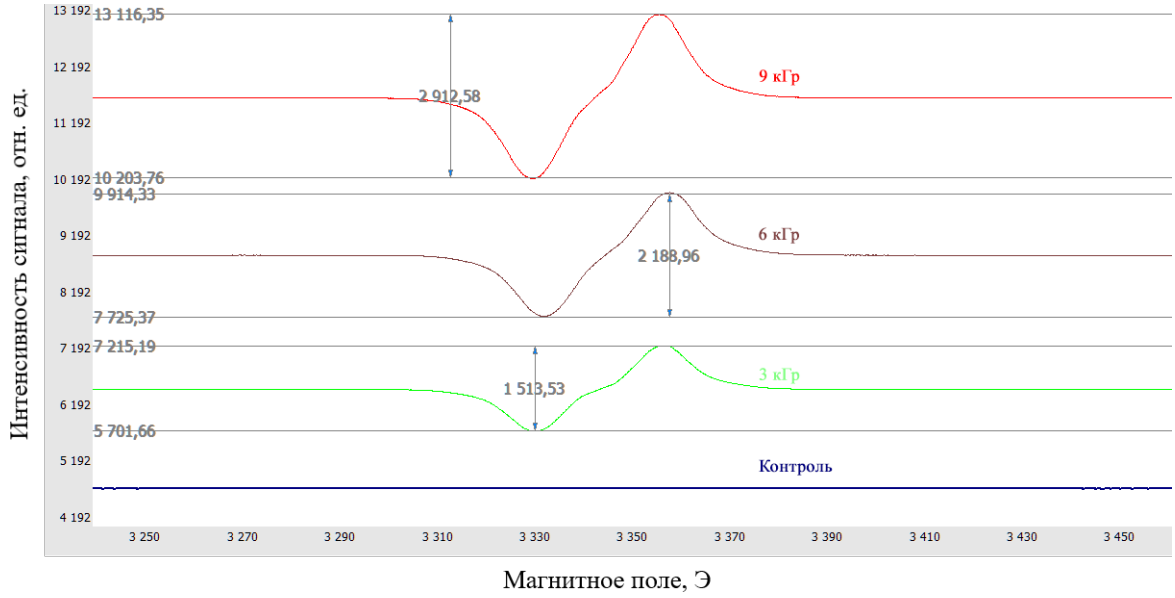


Рис. 1. ЭПР-спектры образцов сахара, зарегистрированные сразу после облучения

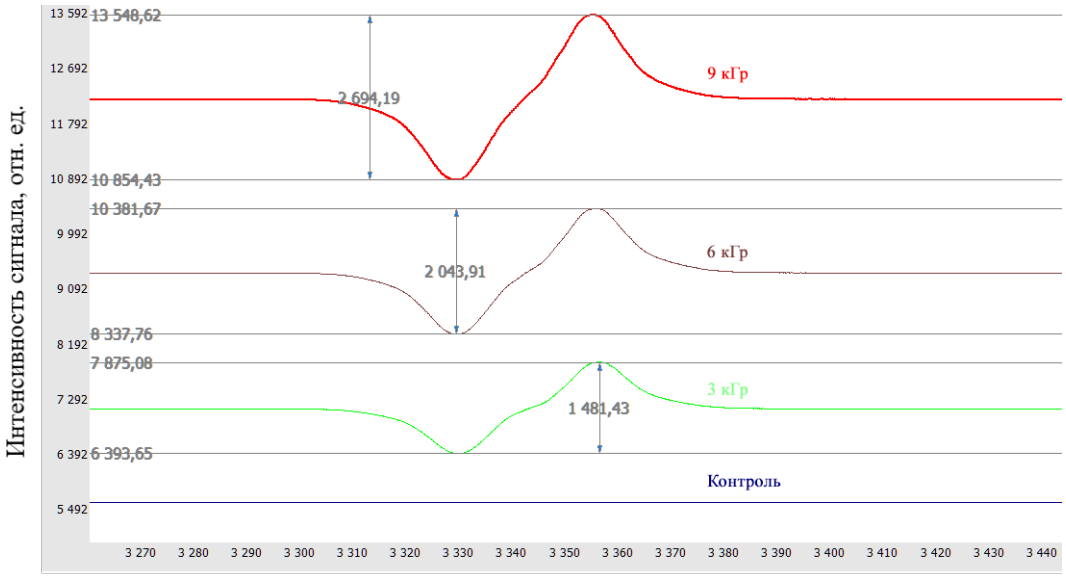


Рис. 2. ЭПР-спектры образцов сахара, зарегистрированные спустя 30 дней после облучения

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовался кристаллический столовый сахар без какой-либо предварительной обработки. Сахар облучался на гамма установке ГУР-120 (Обнинск, ВНИИРАЭ) источником 60Co при комнатной температуре в дозах 3, 6, 9 кГр. Установка состоит из восьми блоков-облучателей. Тип установки – стационарная с сухим способом защиты. Мощность дозы составляла 9025 Гр/ч. Необлученные образцы использовались в качестве контроля. После облучения образцы хранили в закрытом темном помещении при комнатной температуре. Из каждого образца бралось по 200 мг исследуемого вещества и помещалось в специальные кварцевые пробирки, предназначенные для проведения спектрометрии.

ЭПР-спектры регистрировались при помощи спектрометра ESR70-03 XD/2 (Минск, Беларусь). Образцы были проанализированы в день облучения, спустя месяц и 2 месяца. Параметры ЭПР-спектрометра во время измерений были следующими:

- Середина поля – 3300 Э.
- Диапазон поля – 500 Э.
- Модуляция – 5 Э.
- Мощность СВЧ – 200 мВт.
- Постоянная времени – 24,41 мс.
- Время снятия – 100 сек.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлены полученные в ходе исследования спектры образцов сахара, зарегистрированные сразу после процесса облучения.

Как видно из представленного рисунка, образец с дозой 9 кГр имеет пик с амплитудой 2913 отн. ед., 6 кГр – 2189 отн. ед., что на 25 % ниже относительно значения образца с дозой 9 кГр и образец с поглощенной дозой 3 кГр, который имеет амплитуду пика

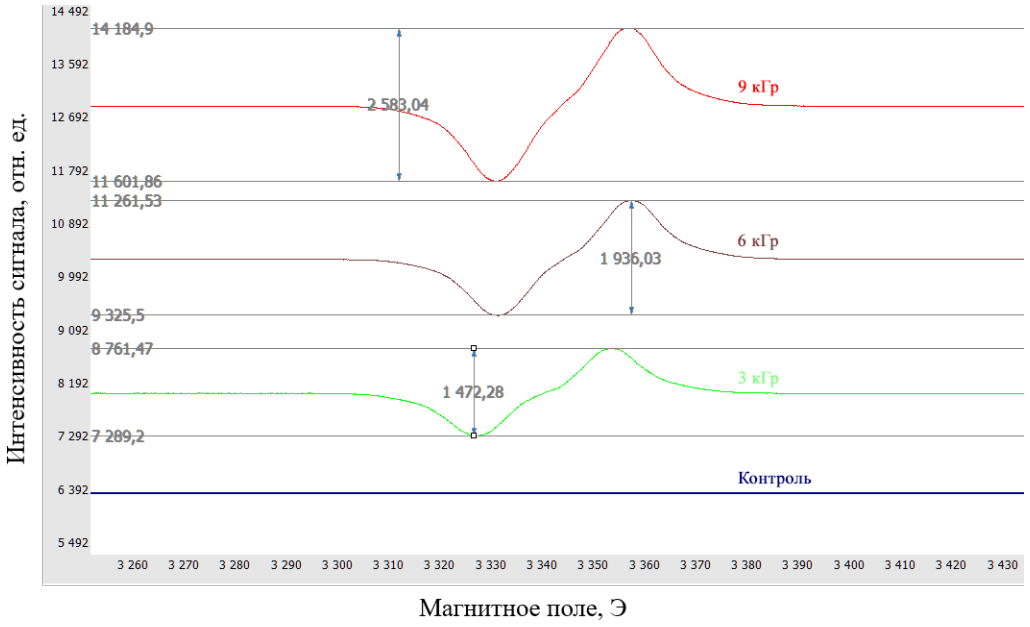


Рис. 3. ЭПР-спектры образцов сахара, зарегистрированные спустя 60 дней после облучения

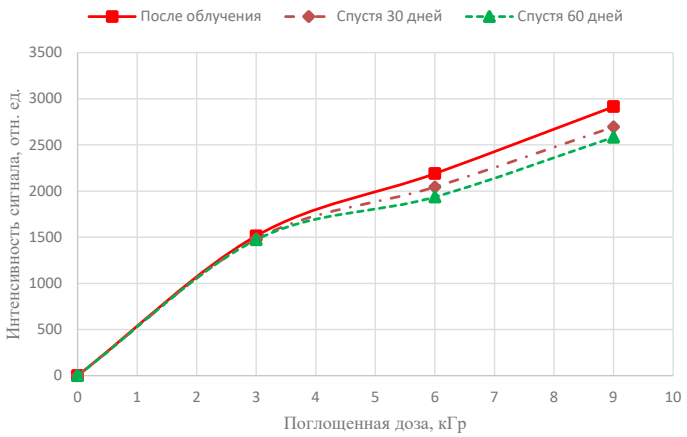


Рис. 4. Прямая зависимость поглощенной дозы от интенсивности сигнала

1514 отн. ед., что на 48 % ниже относительно значения образца с дозой 9 кГр. Контрольный образец не имеет пика.

Спустя 30 дней после процесса облучения было проведено повторное регистрирование спектров образцов сахара. Полученные результаты представлены на рисунке 2.

Образец, облученный дозой 9 кГр имеет пик с амплитудой 2694 отн. ед., 6 кГр – 2044 отн. ед., 3 кГр – 1481 отн. ед. Интенсивность ЭПР-спектров понизилась спустя месяц после процесса облучения. Это объясняется тем, что часть образовавшихся в ходе облучения свободных радикалов распалась [1]. Интенсивность пика образца с дозой облучения 9 кГр понизилась на 7,5 %, 6 кГр – на 6,5 %, 3 кГр – на 2,5 %.

Заключительная регистрация спектров была проведена спустя 60 дней после процесса облучения. Полученные результаты представлены ниже (Рис. 3).

Как видно из рисунка 3, понижение интенсивности ЭПР-пиков все также продолжается, но данное понижение не столь существенное и в несколько раз ниже предыдущего. Интенсивность пика образца с дозой облучения 9 кГр понизилась на 4 % относительно интенсивности пика, зарегистрированного спустя 30 дней после облучения, 6 кГр – на 5 %, 3 кГр – на 0,7 %.

На основании полученных результатов, были построены зависимости «Доза/Интенсивность» для всех 3-х случаев регистрации ЭПР-спектров (рис. 4).

Описанные результаты сопоставимы с данными, полученными M. Mikou et al. [4], N. D. Yordanov et al. [1] и Yordanka Karakirova et al. [5]. В дальнейшем планируется провести регистрацию в течение более длительного времени, а также оценить изменение сигнала от короткоживущих свободных радикалов. Данное исследование пополнило базу данных основных параметров ЭПР-спектров для различных видов пищевой и сельскохозяйственной продукции.

Заключение

На основании полученных данных, можно сделать следующие выводы:

1. Сахар, входящий в состав многих пищевых продуктов, является лучшим и универсальным материалом для дозиметрии при помощи ЭПР-спектрометра, т. к. при регистрации наблюдается отчетливый сигнал, что позволяет с легкостью идентифицировать факт облучения.

2. Зависимость поглощенной дозы от интенсивности сигнала имеет прямолинейный характер. Данную зависимость в дальнейшем можно использовать в качестве градуировочной и определять поглощенную дозу неизвестных образцов сахара.

3. Наблюдается ослабление интенсивности сигнала с течением времени, но данное понижение не столь существенное и никак не препятствует для дозиметрии.

Литература

1. Nicola D Yordanov. EPR and UV spectral study of gamma-irradiated white and burned sugar, fructose and glucose / Nicola D Yordanov, Elka Georgieva // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – Volume 60. – Issue 6, 2004. – P. 1307–1314. – ISSN 1386-1425. – https://doi.org/10.1016/j.saa.2003.10.027.
2. Toshiyuki Nakajima. Dosimetry for radiation emergencies: Radiation-induced free radicals in sugar of various countries and the effect of pulverizing on the ESR signal / Toshiyuki Nakajima, Toshiko Otsuki // International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. – Part A. Applied Radiation and Isotopes. – Volume 41. – Issue 4, 1990. – P. 359–365. – ISSN 0883-2889. – https://doi.org/10.1016/0883-2889(90)90144-6.
3. P. Fattibene. Critical evaluation of the sugar-EPR dosimetry system / P. Fattibene, T. L. Duckworth, M. F. Desrosiers // Applied Radiation and Isotopes. – Volume 47. – Issues 11–12, 1996. – P. 1375–1379. – ISSN 0969-8043. – https://doi.org/10.1016/S0969-8043(96)00254-0.
4. M. Mikou. Performance characteristics of the EPR dosimetry system with table sugar in radiotherapy applications / M. Mikou, N. Ghosne, R. El Baydaoui, Z. Zirari, F. Kuntz // Applied Radiation and Isotopes. – Volume 99, 2015. – P. 1–4. – ISSN 0969-8043. – http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.02.010.
5. Yordanka Karakirova. Time dependence of the EPR and optical spectra of irradiated crystal sugar / Yordanka Karakirova, Nicola D. Yordanov // Radiation Physics and Chemistry. – Volume 168, 2020. – ISSN 0969-806X. – https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108569.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ИХ РОЛЬ В ОЦЕНКЕ И ОСВОЕНИИ ПЛАСТОВО-ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ШУ-САРЫСУЙСКОЙ И СЫРДАРЬИНСКОЙ ПРОВИНЦИЙ КАЗАХСТАНА

А. А. Мендыгалиев[1], Е. Г. Язиков[2], Я. К. Аршамов[1]

[1]Satbayev University
Алматы, Казахстан, adilmslm@mail.ru
[2]Томский политехнический университет
Томск, Россия, yazikoveg@tpu.ru

GEOCHEMICAL FEATURES AND THEIR ROLE IN THE ASSESSMENT AND DEVELOPMENT OF THE ROLL-FRONT URANIUM DEPOSITS IN THE SHU-SARYSUY AND SYRDARYA PROVINCES OF KAZAKHSTAN

A. A. Mendygaliyev[1], E. G. Yazikov[2], Y. K. Arshamov[1]

[1]Satbayev University
Almaty, Kazakhstan, adilmslm@mail.ru
[2]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, yazikoveg@tpu.ru

The geochemistry of rocks and waters of productive horizons forms the redox environment of the subsoil and determines the main ore-controlling factor in the formation of «roll-front» uranium deposits in the Shu-Sarysu and Syrdara provinces. Increasing the consumption of leaching agents because of the high electrochemical activity of harmful impurities as well as colmatation effects create technological obstacles to the development of deposits by the sulfuric acid method of in-situ leaching, and therefore several blocks belonging to the technological imbalance (mainly in terms of carbonate content, CO_2 > = 2 %).

Введение

Технологическая простота извлечения минерального сырья из недр и чистота извлекаемого сырья в большей степени определяются геохимическими особенностями отрабатываемых недр. Даже при наличии богатых содержаний полезных компонентов присутствие вредных примесей может приводить к чрезмерно большим тратам реагентов на извлечение или очистку минерального сырья, ухудшать фильтрационные или диффузионные свойства веществ, приводить к аварийным обстановкам или вовсе препятствовать возможности извлечения полезных компонентов. Наличие полезных примесей и попутных полезных компонентов напротив могут приводить как к технологическим улучшениях, так и к повышению общей ценности извлекаемого сырья. Несмотря на это геохимические особенности продуктивных горизонтов пластово-инфильтрационных месторождений урана традиционно изучаются второстепенно и относительно поверхностно. Данная статья посвящена обобщенному исследованию геохимических особенностей данных месторождений на основе геологоразведочных работ на Шу-Сарысуйской и Сырдарьинской провинциях.

Материалы и методы

Геохимические исследования при поисково-разведочных исследованиях пластово-инфильтрационных месторождениях урана Шу-Сарысуйской и Сырдарьинской урановорудных провинциях (УРП) традиционно проводятся второстепенно на керновых минералого-геохимических профилях по сети в два-четыре раза превышающей разведочную (800 м при разведочной сети 400–200 × 50 м и 1600–3200 м при разведочной сети 800–400 × 100–50 м). По данным геохимическим исследований составляются геохимические разрезы и карты масштаба 1 : 25 000 и 1 : 5 000. При геохимических исследованиях проводятся количественные определения $C_{орг.}$, $S_{общ.}$, $S_{сульф}$, форм железа, Sc, Se, Re, Y, Mo, ΣTR, смежно с которыми проводится также рудное опробование на U, Ra, изучается гранулометрический состав и карбонатность, pH и плотный остаток, виды состава органики и минералогические исследования. Более подробные геохимические исследования проводились на более ранних региональных стадиях исследований. На основе Отчётных результатов геологоразведочных работ на месторождениях урана Шу-Сарысуйской и Сырдарьинской провинций и предшествующих региональных исследований определены геохимические особенности данных провинций и отмечена их роль в оценке и освоении месторождений.

Результаты и их обсуждение

Месторождения Шу-Сарысуйской и Сырдарьинской УРП локализованы в песчаных горизонтах артезианских бассейнов верхнего мела и палеогена разделенным на две провинции более молодым Каратауским поднятием.

Мынкудукский горизонт – K_2t_1. По данным геохимических исследований характерные спектры элементов отмечены повышенными концентрациями свинца, фосфора и марганца в сероцветных отложениях, циркония и кобальта – в красноцветных и пестроцветных, вольфрама и кобальта – в эпигенетически окисленных. Кларки концентрации по данным геохимической обработки спектральных анализов песчаных проб керна характеризуются повышенными значениями для Pb (3,9), Zn (5,6), Cu (9,78), Ba (13,38), Ag (2,61), W (5,45), Mo (32,11), Be (6,12), Sn (13,01), Mn (211,2), V (4,07), Nb (24,7), Ti (3,11), Sc (10,54), As (32,2), Sb (74,09), Ni (24,04) и ряда других элементов. Прослои глин и алевропелитов выделяются надкларковыми значениями Ag (29,5).

Тяжелая фракция песков мынкудукского горизонта содержит повышенные концентрации сидерита, ильменита, лейкоксена, циркона, андалузита

Инкудукский горизонт – K_2t_2-$Р_1^1$. По данным спектрального анализа сероцветные и зеленоцветные слагающие его песчаные породы характеризуются повышенными кларками концентрации некоторых рудных элементов: Pb – 5,84; Zn – 5,44; Cu – 14,67; Ag – 2,61 (в глинах – 12,03); Mo – 35,11; W – 3,93; Sn – 8,93; Be – 5,69; V – 3,98; Mn – 148,12; Ti – 3,12; P – 2,96; Ba – 11,35; Nb – 27,74; Ag – 1,75 (в глинах – 12,03); Sc – 10,54; Ni – 25,75; As – 37,5. Зеленоцветно-сероцветные глины горизонта выделяются ещё более высокими значениями кларков концентрации V (5,31) и Mn (286,9).

В тяжелой фракции песчаных пород класса 0,25–0,1 мм отмечаются повышенные концентрации сидерита, ильменита и лейкоксена, циркона, ставролита и андалузита.

Жалпакский горизонт – K_{2km}-P_1^1. Величина кларков концентрации характерных элементов (в неокисленных сероцветных и зеленоцветных песчаных породах как наиболее представительных): Cu – 8,59, Pb – 4,74, Zn – 5,09, Mo – 25,86, V – 4,88, Mn – 233,20, Ba – 12,27, Ag – 2,18, Ti – 3,47, Sn – 15,90, Nb – 22,0, W – 4,58, Sc – 10,39, La – 1,77, Ce – 0,60. Кларк концентрации большинства цветных, некоторых редких и редкозе-мельных элементов характеризуется повышенными значениями в неокисленных песках горизонта. В глинах, как и в других горизонтах, резко возрастает кларк концентрации серебра и, в определенной мере, иттрия. Что касается других элементов, то их кларк концентрации в зеленоцветно-сероцветных глинах меньше (Pb, Zn, V, Ti, W, Li) или значительно меньше (Mo, Cu, Mn, Ba, Sn, Nb), чем в песчаных отложениях.

Зона древнего грунтового окисления характеризуется в песках ещё более высокими концентрациями марганца (246,5), практически такими же - скандия (8,39 и 9,70), для зоны вторичного восстановления характерна повышенная карбонатность, каолинизация, новообразования сульфидов железа

Уванасский (канжуганский) горизонт – $Р_1^{1-2}$. Кларки концентрации в зеленоцветно-сероцветных песках уванасского горизонта некоторых химических элементов (в основном данные полуколичественного спектрального анализа): Pb – 5,14, Zn – 4,96, Cu – 12,93, Mo – 29,53, W – 3,76, Sn – 13,57, Nb – 35,17, Ag – 2,49, V – 4,59, Mn – 189,51, Ti – 8,57, Ba – 15,45, Sc – 10,08, Y – 1,35, Yb – 9,34, Li – 4,89. Ряд цветных металлов (Pb, Zn, Cu, Mo, W, Sn), благородных (Ag), черных (Mn, V, Ti), редких (Nb) и редкоземельных (Yb) элементов присутствуют в уванасском горизонте в аномально повышенных концентрациях. В глинах, за некоторыми исключениями (Ag – 17,11, Y – 2,14, Yb – 14,37), содержание указанных элементов, как правило, ниже. То же самое можно отметить и в отношении желто-цветных эпигенетически-окисленных песков и, в целом, для окисленных и пестроцветных глин, в которых в повышенных концентрациях присутствуют те же элементы (Ag, Y, Yb).

Уюкский горизонт – $Р_1^2 – Р_2^1$. В проницаемых зеленоцветно-сероцветных отложениях, по данным обработки результатов спектрального анализа проб керна, кларки концентрации значатся: Pb – 5,6, Zn – 4,73, Cu – 13,50, Ag – 2,81, Ba – 15,43, Mo – 35,92, Sn – 12,69, W – 3,96, Be – 12,3, Nb – 32,77, Mn – 149,35, V – 4,52, Ti – 3,68, Y – 1,34, Yb – 7,20, La – 1,40, Sc – 9,91, Li – 4,07.

Так же, как и в других горизонтах платформенного комплекса, в проницаемых отложениях уюкского горизонта отмечаются повышенные кларки концентрации основных цветных элементов (Pb, Zn, Cu, Mo, W, Be, Sn), серебра, некоторых редких (Nb) и рассеянных (Sc), редкоземельных (Yb) и черных (V, Mn, Ti) металлов. В глинах, за исключением отдельных элементов (Ag, Yb и др.), их содержание, как правило, ниже, так же как и в пластово-окисленных породах. Некоторые элементы встречаются в аномально повышенных концентрациях: в связи с сульфидной минерализацией – незначительные концентрации Mo – до 0,08 %, Cu – до 0,01 % и Zn – до 0,01 %; в песках и глинах- редкоземельные концентрации иттриевой группы – в сумме до 0,03 % и выше; аномальные содержания фосфора, приуроченные к скоплениям костей и чешуй рыб (0,03–0,8 %); в связи с акцессорными минералами – повышенные содержания Ti (до 0,4 %), циркония (до 0,06 %). Однако выдержанных рудных тел или значимых ореолов указанные элементы, за исключением редкоземельных, не образуют.

Иканский горизонт $Р_2^2$. кларки концентрации в серых и зелено-цветных песках иканского горизонта: Pb – 5,2, Zn – 4,91, Cu – 12,49, Mo – 35,53, W – 3,17,

Sn – 11,59, Mn – 232,19, V – 5,21, Ti – 2,59, Ag – 2,81, Ba – 17,27, Sc – 10,16, La – 1,41, Ce – 0,47, Yb – 9,46, Y – 1,40, Nb – 31,56, Li – 4,21. Как следует из этих геохимических (спектральных) данных, провинциальный кларк концентрации в песках иканского горизонта либо выше (Pb, Zn, W, V, Ti, Ag, La, Y, Li), либо много выше (Cu, Mo, Sc, Yb, Nb) относительно установленных для этого типа пород. В глинистых (непроницаемых) породах кларки концентрации ниже. Исключение составляют серебро (в глинах 17,34) и иттрий (2,21).

Интымакский горизонт – $Р_2^{2-3}$. Кларки концентрации в зеленоцветно-сероцветных песках следующие: Pb – 4,3, Zn – 6,12, Cu – 10,37, Mo – 35,88, W – 4,60, Sn – 12,0, Ag – 3,53, Ba – 15,35, V – 6,68, Mn – 243,2, Ti – 3,31, Nb – 7,78, Y – 2,02, Yb – 24,73, Sc – 19,75, Li – 3,53. Таким образом в данном горизонте в повышенных концентрациях присутствуют те же, что и в других мел-палеогеновых отложениях элементы – цветные, черные, редкоземельные, благородные (серебро).

По ряду проб, отобранных из различных пачек горизонта, отмечаются повышенные и аномальные содержания Mo – 0,005–0,006 %, V – до 0,1–0,15 %, Y – 0,01–0,008 %, P – 0,1–1,0 %. В базальном слое, помимо указанных, присутствуют аномальные значения Ni и Co – до 0,015–0,02 %, Zn – 0,015, Cu – до 0,01 %.

Таким образом Шу-Сарысуйская и Сырдарьинская УРП также являются редкоземельными и полиметаллическими провинциями, а возможность попутного выщелачивания многих из перечисленных компонентов уже была доказана в тематических и специализированных работах. Помимо полезных компонентов при оценке месторождений особое внимание уделяется карбонатности. Несмотря на то, что все месторождения относятся к бескарбонатным (CO_2 < 2 %) и слабокарбонатным (2–4 % CO_2) даже небольшие содержания карбонатности приводят к значительным повышениям расхода выщелачивающих реагентов и негативным кольматационным эффектам, в связи с чем блока с карбонатностью >= 2 % относятся к технологическому забалансу.

Заключение

В профиле рудоконтролирующей зональности по направлению движения подземных вод выделяются три основные зоны: пластового окисления, оруденения и неокисленных безрудных пород.

В первой зоне воды содержат свободный кислород и обладают высокими положительными значениями окислительно-восстановительного потенциала (ОВП). Минералы двухвалентного железа в породах здесь полностью замещены гидрооксидами железа. Пластовые воды этой зоны обладают повышенными концентрациями урана ($n \cdot 10^{-5} – n \cdot 10^{-6}$ г/дм^3), селена, молибдена, рения, скандия, редких земель.

Вторая зона характеризуется повышенными содержаниями в рудных песках веществ - восстановителей (Fe^{2+}, H_2^+, H_2S, S^{2-}, $C_{орг}$, P_2O_5), резким снижением Eh вод до отрицательных значений и развитием анаэробной (сульфатредуцирующей, водородообразующей) микрофлоры. Здесь происходит осаждение урана и ряда других элементов с переменной валентностью (Se, Mo, Re) на восстановительном геохимическом барьере. В воде уменьшается содержание сульфат-иона, иногда незначительно падает их общая минерализация, а концентрации урана не превышают $3 \cdot 10^{-6}$ г/дм^3.

В третьей зоне породы не изменены эпигенетическими процессами окислительного характера и содержат фоновые концентрации сопутствующих элементов. В пластовых водах этой зоны, как правило, не отмечаются высокие концентрации элементов, участвующих в рудных эпигенетических процессах на границах ЗПО. Содержания урана не превышают $n \cdot 10^{-7}$ г/дм^3.

Геохимические и гидрогеохимические исследования позволяют оценить роль попутных полезных компонентов, рудоконтролирующую зональность,

Таблица 1. Распределение аномальных значений некоторых элементов по данным спектрального анализа

№№ п/п	Наименование горизонтов	Всего проявлений	в т. ч. по элементам			
			Лантан ≥ $1,5 \cdot 10^{-2}$	Церий ≥ $1,5 \cdot 10^{-2}$	Иттербий ≥ $1 \cdot 10^{-2}$	Иттрий ≥ $10 \cdot 10^{-3}$
1.	интымакский $Р_2^{2-3}$	38	10	2	1	25
2.	иканский – $Р_2^2$	27	12	2	2	11
3.	уюкский – $Р_2^1$	23	14	-	2	7
4.	уванасский $Р_1^2$	34	15	6	2	11
5.	жалпакский $К_2$km-$Р_1^1$	23	7	5	2	9
6.	инкудукский $К_2t_2$-st	8	2	2	–	4
7.	мынкудукский $К_2t_1$	4	1	1	–	2

благоприятные примеси окислителей, количественный анализ форм восстановителей и сорбентов с различной степенью технологического извлекаемости и тем самым более подробно оценить месторождений, снизить риски и улучшить условия для установления оптимального технологического режима их вскрытия и отработки.

Литература

1. Геологическое строение Чу-Сарысуйской депрессии. – Л., 1980. – Инв. № 2552 с, фонды ЦНИЛ.
2. Артезианские воды Чу-Сарысуйской впадины. Ахмедсафин и др. А-Ата, «Наука» Каз.ССР,1979.
3. Отчет Изучение геолого-гидрогеологических и технологических особенностей руд и вмещающих пород месторождений Чу-Сарысуйской депрессии с целью усовершенствования и оптимизации процесса ПВ для промышленной добычи урана. Инв. № 2470 с, фонды ЦНИЛ, 1979.
4. ОТЧЕТ по глубинному геологическому картированию мезозойско-кайнозойского чехла Чу-Сарысуйской депрессии в масштабе 1 : 200000 листов L-42-XXII, XXVIII, XXXII (124), XXXIII, XXXIV, K-42-III (5-Б, 6-А, Б, Г), IV (7–8) за 1996-2001 гг.
5. К. Г. Бровин, И. В. Венатовский и др., СЫРДАРЬИНСКАЯ УРАНОВОРУДНАЯ ПРОВИНЦИЯ. – Москва, Ротапринт ОЭП ВИМСа, 1985.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ В РФ МЕТОДА КНД-М ПРИ РАЗВЕДКЕ И ОТРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА СКВАЖИННЫМ ПОДЗЕМНЫМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ

А. Р. Миносьянц[1], А. А. Новгородцев[1], Е. А. Гурулев[2], Ю. И. Лаптев[3]

[1]Акционерное общество «РУСБУРМАШ»
Москва, Россия, ARMinosyants@rbm-armz.ru, AANovgorodtsev@rbm-armz.ru
[2]Акционерное общество «Хиагда»
Чита, Россия, EvAGurulev@rosatom.ru
[3]Акционерное общество «Далур»
Уксянское, Россия, YILaptev@rosatom.ru

EXPERIENCE OF USING THE KND-M METHOD IN THE RUSSIAN FEDERATION FOR EXPLORATION AND DEVELOPMENT OF URANIUM DEPOSITS BOREHOLE UNDERGROUND LEACHING

A. R. Minosyants[1], E. A. Gurulev[2], Y. I. Laptev[3]

[1]"RUSBURMASH" Corp
Moscow, Russia, ARMinosyants@rbm-armz.ru, AANovgorodtsev@rbm-armz.ru
[2]"Hiagda" Corp
Chita, Russia, EvAGurulev@rosatom.ru
[3]"Dalur" Corp
Uksyanskoe, Russia, YILaptev@rosatom.ru

The report presents some results of the KND-M method application with the AINK-49 equipment in the exploration and operation of uranium deposits by borehole underground leaching. It shows the possibility of using the KND-M method for rapid assessment of the main radiological characteristics of ores at the stage of field exploration. It also presents some results of refining the reserves of individual blocks during mining and preparatory work. The results of the assessment of the residual and technogenic redeposited uranium in the subsurface at the existing sites of borehole underground leaching during their modernization of the sites and in the wells of control drilling are shown.

Введение

Представленный материал тезисно обобщает имеющийся опыт применения метода КНД-М в России, для решения различных задач при ведении разведочных, горно-подготовительных работ и отработке месторождений урана способом СПВ в период с 2016 по 2020 гг.

В статье приведены основные результаты Опытно-методических (ОМР) и опытно-промышленных

работ (ОПР), выполненных методами каротажа мгновенных нейтронов деления (КНД-М) и импульсного нейтрон-нейтронного каротажа (ИННК) с применением аппаратурно-методического комплекса АМК КНД-М (АИНК-49), изложены краткие сведения об аппаратурном, метрологическом обеспечении работ, оценке качества и достоверности информации, получаемой методами КНД-М и ИННК.

Представленные материалы позволяют получить общее представление о возможностях, достоинствах и сложностях применения метода КНД-М на уранодобывающих предприятиях России.

Краткие сведения об аппаратурном, метрологическом обеспечении, контроле качества и достоверности метода КНД-М

Комплекс нового поколения АМК КНД-М или АИНК-49 (рис. 1), разработан в 2011–13 гг. во «ВНИИА им. Н. Л. Духова» по инициативе ОАО «Атомредметзолото».

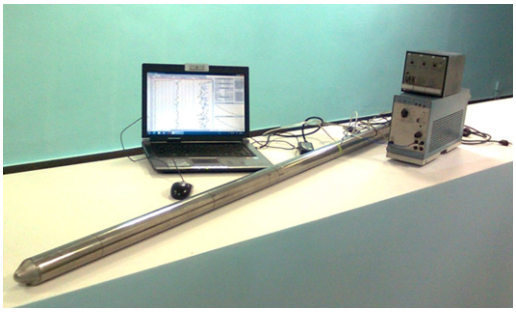


Рис. 1. АИНК-49. Скважинный прибор и аппаратура регистрации и управления

Применение в АИНК-49 новых принципов компоновки позволили получить приборы диаметром 49 мм, а применение новых нейтронных генераторов ИНГ-12-50-100БТ увеличило ресурс работы генератора до 200 часов.

В 2013 г. комплекс прошел метрологическую аттестацию в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» (г. Санкт-Петербург) и был утвержден в качестве типа средств измерений с внесением в Государственный Реестр средств измерений РФ.

В 2015 г. Методика измерений (МИ) с АИНК-49, реализованная в «Инструкции по каротажу методом мгновенных нейтронов деления на месторождениях урана пластово-инфильтрационного (песчаникового) типа с применением двухзондовой аппаратуры типа АМК КНД-М в модификации АИНК-49» [1] была аттестована в соответствии с ГОСТ Р 8.563-2009 и ГОСТ 8.010-2013 и имеет Свидетельство об аттестации № 634/210-(01.00250)-2015, выданное ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Двухзондовая конструкция АИНК-49 позволяет выполнять «прямое» определение массовой доли урана в рудных интервалах (РИ) исследуемых скважин методом КНД-М и проводить оценку влажности и литологических характеристик пород продуктивного горизонта методом ИННК в условиях естественного залегания.

Метрологическое обеспечение метода КНД-М (поверка АИНК-49), выполнялось в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» (г. С-Петербург). Полевая тарировка АИНК-49 выполнялась в контрольно-поверочной скважине КПС К532А (ГСО СОСВУРТ-КПС), принадлежащей АО «Урангеологоразведка».

Контроль качества измерений при работе методом КНД-М, как правило, выполнялся по сопоставлению основных и контрольных каротажа рядовых скважин. В некоторых случаях для этого использовались результаты измерений на КПС-1, сооруженной на месторождении Хиагдинское в 2019 г. Объем контроля составлял не менее 10 % от объема выполненных каротажей. Результаты контроля, полученные в период с 2013 г. по 2020 г. на различных объектах АО Хиагда» и АО «Далур» показали, что погрешность измерений для всех основных каналов АИНК-49 соответствуют требованиям Инструкции [1] и обеспечивают необходимое для количественного метода качество измерений с применением АИНК-49.

Достоверность метода КНД-М оценивалась путем сопоставления параметров рудных интервалов (РИ): мощности РИ (m) и метропроцента (mC), полученных по данным КНД-М и контрольного метода, – геологического опробования керна (ГО). Статистически представительные данные по оценке достоверности КНД-М были получены в период проведения ОМР и ОПР на месторождении Хохловское (2013–2016 гг.) и при проведении геологоразведочных работ на месторождении Добровольное (2019–2020 гг.) Эти данные свидетельствуют об отсутствии статистически значимых систематических расхождений для m и mC. Случайные средние квадратические расхождениях для m (S_m) во всех случаях не превышают допустимое значение ± 0,20 м, а относительные случайные средние квадратические расхождения для mC (S_{mC}) не превышают допустимое значение ± 25 %, установленные Инструкцией [1].

Результаты и их обсуждение

Опыт применения методов КНД-М и ИННК на разведочных работах

ОПР с аппаратурой АИНК-49, проведенные на месторождении Хохловскоев 2015–16 гг., несмотря на относительно небольшой объем работ, позволили получить интересные результаты. В процессе этих работ впервые была исследована возможность применения канала ИННК аппаратуры АИНК-49 для выделения ЗБТ в непроницаемых рудах. Для этой цели было предложено использовать зависимость между

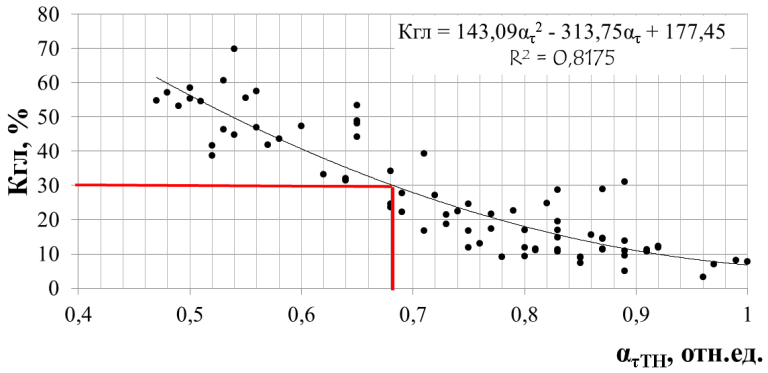


Рис. 2. Регрессионная зависимость между Кгл. и αтТН. Месторождение Хохловское

суммой глинисто-алевритовой фракций (Кгл.) и параметром $\alpha_{\tau TH}$, определяемым как отношение среднего значения времени жизни тепловых нейтронов ($\tau_{тн}$) в выделяемых пластах к его максимальному значению τтнmax в исследованном интервале продуктивного горизонта. Установлено наличие тесной связи между Кгл. и $\alpha_{\tau TH}$ с коэффициентом корреляции –0,89. Полученное уравнение регрессии для расчета Кгл. по $\alpha_{\tau TH}$ представлено на рис. 2.

Анализ точности определения мощности непроницаемых пластов, выделяемых методом ИННК по описанной выше регрессии, проведенный по сопоставлению с результатами ГО и электрокаротажа (ПС) показал, что расхождения средних мощностей отсутствуют, а случайные средние квадратические расхождения между мощностями непроницаемых пластов составляют ± 0,15 м и не превышают допустимое значение (0,20 м), регламентированное Инструкцией [1], и Инструкцией по гамма-каротажу при поисках и разведке урановых месторождений [2].

Одно из преимуществ метода ИННК по отношению к методу ПС, применяющемуся для выделения ЗБТ на месторождении Хохловское, заключается в высокой устойчивости к электрическим техногенным помехам, что особенно важно при ведении интенсивных буровых работ.

Результаты ОПР на месторождении Хохловское в 2015–2016 гг., позволили при отсутствии эффекта «отжатия» Rn провести оценку одного из основных радиологических показателей – коэффициента радиоактивного равновесия между U и Ra (Крр) двумя различными способами: по результатам ГО и с использованием методов ГК и КНД-М. Для этого были использованы данные ГО пяти керновых скважин ряда 2–8 Центральной залежи месторождения Хохловское. Средневзвешеное значение Крр по данным ГО составило 1,15, что полностью совпадает с результатом, полученным по данным ГК и КНД-М.

Полученная по ГК и КНД-М оценка Крр для всех 13 скважин ряда 2–8 составила 1,01. что подтверждает возможность применения на Центральной Залежи месторождения Хохловское значения Крр равного 1,0 полученного по результатам разведочных работ. Таким образом, была подтверждена надежность и достоверность применения методов ГК и КНД-М для оперативной оценки Крр при отсутствии эффекта «отжатия» Rn.

Опыт применения метода КНД-М при проведении горно-подготовительных работ

Применение метода КНД-М при горно-подготовительных работах (ГПР) на участках, подготавливаемых к отработке методом СПВ может быть использована для решения двух задач. Первая задача - это заверка результатов ГК при отсутствии другого контрольного метода (ГО). Вторая задача – возможность уточнения основных радиологических поправок (Крр и P_{Rn}) для конкретного блока или участка месторождения на представительном материале, что обеспечивается при ГПР высокой плотностью сети скважин.

Ввиду того, что сооружение технологических скважин значительно отличается от проходки разведочных скважин, проявление эффекта «отжатия» радона при ведении ГПР и при разведочном бурении может существенно отличаться. При ведении ГПР это может повлиять на достоверность определения подсчетных параметров РИ методом ГК с использованием поправки на «отжатие» Rn (P_{Rn}), полученной по результатам разведочных работ. Использование методов ГК и КНД-М для оценки суммарной поправки Пк равной P_{Rn}/Крр в этом случае может оказаться весьма полезным.

В качестве примера можно привести результаты работ методом КНД-М, полученные при проведении ГПР на блоке В1.3 Залежи В1 (низовья палеодолины В1) месторождения Вершинное в 2018 г. Грубые (ввиду небольшого объема данных) оценки Крр и P_{Rn}, полученные по данным ГО разведочных скважинам в контуре блока составляют 0,94 и 1,49 соответственно, при принятых значениях по месторождению Крр = 1 и P_{Rn} = 1. Соответственно оценка Пк = P_{Rn}/Крр рассчитанная для блока В1.3 по данным ГО составила 1,59. При этом значение Пк, полученное по результатам разведочных работ для месторождения Вершинное в целом составило 1,1 (при Крр = 1 и P_{Rn} = 1,1).

Это обстоятельство является основным фактором, приводящим к существенному (на 35 %) статистически значимому систематическому занижению линейной продуктивности РИ на 35 %, полученному при сопоставлении данных ГК с данными ГО разведочных скважин в контуре блока. Учитывая невысокую представительность данных ГО для блока, такой результат может показаться сомнительным, однако, сопоставление результатов КНД-М с результатами интерпретации ГК на блоке В1.3, выполненное на представительной выборке из 51 РИ 18 технологических скважин, полностью подтвердило выявленный факт. Систематическое занижение среднего метропроцента РИ по ГК относительно КНД-М в проницаемых осадках для блока В1.3 составило 36 %.

Значительное проявления эффекта «отжатия» Rn при сооружении технологических скважин на блоке В1.3 подтверждается также результатами контрольных измерений методом ГК, выполненных через месяц после сооружения исследованных технологических скважин.

Аналогичные работы с применением метода КНД-М были проведены в 2019 г. и в верхней части палеодолины В1 при сооружении технологических скважин блоков В1.17 и В1.18. Предварительная грубая оценка средневзвешенного значения Крр по данным ГО разведочных скважин для этого участка составила 1,01, а оценка PRn составила 1,16.

Применение при интерпретации ГК принятых для месторождения Вершинное значений Крр = 1,0 и поправки P_{Rn} = 1,1 дают вполне адекватные результаты для скважин блоков В1.17 и В1.18. Сопоставление прессованных параметров 49 урановорудных сечений в проницаемых осадках для 36 рудных скважин, полученных по данным ГК и КНД-М, показали незначительные относительные расхождения как для суммарной мощности РИ (3,3 %), так и для суммарного метропроцента РИ (–3,5 %).

Приведенные выше результаты показывают, что применение метода КНД-М при ведении ГПР позволяет выявить существенные различия основных радиологических характеристик между отдельными блоками и выполнить их количественную оценку на достаточно представительных материалах. Результаты КНД-М, полученные при ведении ГПР, должны использоваться для подсчёта запасов урана в отдельных добычных блоках и при геотехнологическом моделировании.

Опыт применения метода КНД-М на действующих участках СПВ

Основной задачей при использовании метода КНД-М на действующих полигонах СПВ, является оценка остаточного и техногенно переотложенного урана в недрах. Метод КНД-М успешно заменяет керновое бурение для решения этой важной задачи.

Другая задача, – это оценка степени извлечения урана из недр. Основная проблема в этом случае связана с оценкой исходной продуктивности исследуемых скважин.

При проведении измерений во вновь сооружаемых скважинах на действующих или отработанных блоках СПВ, в качестве исходной продуктивности, как правило, принимается оценка, полученная по результатам ГК этих скважин. Однако ввиду имеющих место вариациях Крр и фактора «отжатия» радона, о чём было сказано выше, такой подход не является строго корректным

По результатам работ методом КНД-М при реализации программы модернизации действующих полигонов СПВ на месторождения Хиагдинское установлено, что в 17 исследованных добуренных скважинах действующих блоков Залежей Х3 и Х3а относительная остаточная продуктивность по отношению к исходной (по ГК), меняется в диапазоне от 43,2 % до 157,6 %. Для этих скважин, характеризующих центральную часть междурядья существующей сети технологических скважин, остаточная суммарная продуктивность по КНД-М совпадает с оценкой исходной суммарной продуктивности по ГК

Высокие (более 100 %) значения относительной остаточной продуктивности некоторых скважин свя-

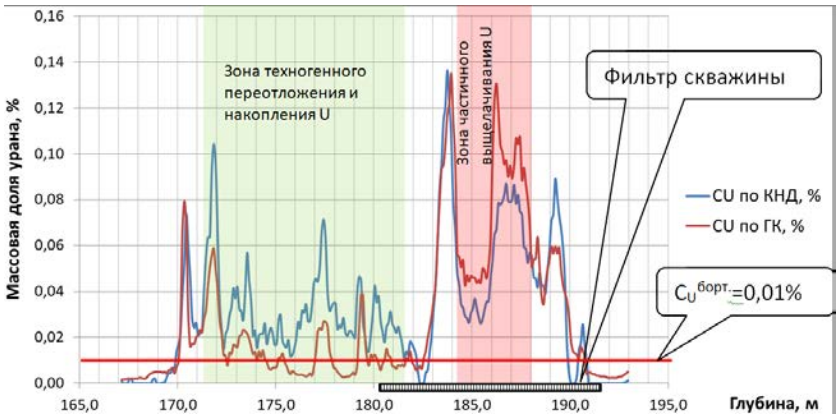


Рис. 3. Сопоставление диаграмм распределения массовой доли U по ГК (оценка исходного состояния) и КНД-М (текущая оценка) по скважине 3.12.26 блока Х3.12

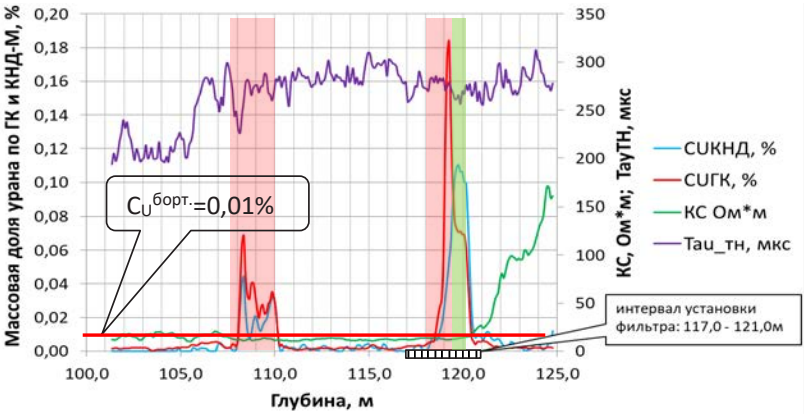


Рис. 4. Сопоставление диаграмм распределения массовой доли U по ГК (оценка исходного состояния) и КНД-М (текущая оценка) по откачной перебуренной скважине 6.3.8

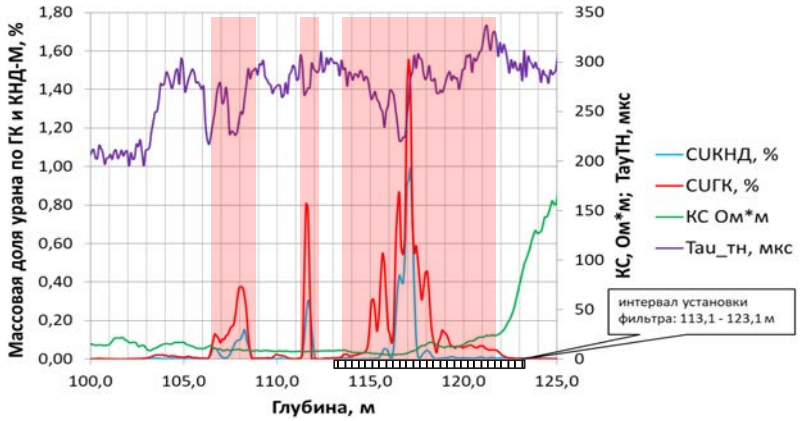


Рис. 5. Сопоставление диаграмм распределения массовой доли U по ГК (оценка исходного состояния) и КНД-М (текущая оценка) по закачной перебуренной скважине 6.3.8

заны с наличием техногенно перераспределенного урана, а также с невысоким извлечением урана в зоне выщелачивания. Характерный пример приведен на Рис. 3.

В перебуренных технологических скважинах на действующих блоках Залежи Х6 месторождения Хиагдинское установлены значимо различающиеся результаты для откачных и закачных скважин. Характерные диаграммы распределения массовой доли урана для откачных и закачных скважин представлены на рис. 4 и рис. 5 соответственно.

Для 10 перебуренных закачных технологических скважин закономерной особенностью является низкое значение средней относительной остаточной продуктивности (17,2 %) при изменчивости от 1,3 до 55,5 % и отсутствие участков техногенно перераспределенного или накопленного урана.

Для трех перебуренных откачных скважин закономерны высокая относительная остаточная продуктивность, изменяющаяся в диапазоне от 40,7 до 91,3 % при среднем значении 70,4 % и наличие участков техногенно переотложенного урана.

Заключение

Двухзондовая конструкция АИНК-49 выгодно отличает его от серийно выпускаемой аппаратуры АИНК-60, т.к. существенно повышает точность и достоверность определения параметров РИ и предоставляет возможность выделения технологически забалансовых руд в непроницаемых породах, как неизменённом, так и в техногенно изменённом разрезе.

Достоверность метода КНД-М не уступает достоверности традиционного контрольного метода ГО. Представительность метода КНД-М, определяемая радиусом исследования, существенно выше, чем у ГО. Оперативность получения результатов и относительно невысокая стоимость работ для метода КНД-М по отношению к комплексу работ геологического содержания и лабораторных исследований керна, позволяют считать оправданным и целесообразным применение метода КНД-М как основного для количественной оценки параметров рудных интервалов, так и в качестве контрольного метода для оперативной оценки достоверности результатов

метода ГК на всех этапах жизненного цикла месторождений подготавливаемых и отрабатываемых методом СПВ.

Важным является и то, что метод КНД-М на стадии разведочных работ и ГПР может использоваться в комплекса с ГК для оперативной и достоверной оценки суммарной поправки включающей коэффициент радиоактивного равновесия между U и Ra (Крр), и поправку на «отжатие» Rn (P_{Rn}).

Литература

1. Инструкции по каротажу методом мгновенных нейтронов деления на месторождениях урана пластово-инфильтрационного (песчаникового) типа с применением двухзондовой аппаратуры типа АМК КНД-М в модификации АИНК-49», И. М. Хайкович, Г. И. Ганичев. – СПб., ФГУНПП «Геологоразведка, 2014.
2. Инструкция по гамма-каротажу при поисках и разведке урановых месторождений, И. М. Хайкович, Л. В. Зернов, Э. Ф.Уваров и др., М. Министерство геологии СССР, 1987.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА УРАН НА ТЕРРИТОРИИ РФ

Ю. Б. Миронов, А. А. Пуговкин

ФГБУ «ВСЕГЕИ»
Санкт-Петербург, Россия, Yuri_Mironov@vsegei.ru, Aleksey_Pugovkin@vsegei.ru

MAIN DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF REGIONAL GEOLOGICAL EXPLORATION WORKS ON URANIUM IN THE TERRITORY OF THE RUSSIAN FEDERATION

Yu. B. Mironov, A. A. Pugovkin

FGBU “VSEGEI”
Sankt-Petersburg, Russia, Yuri_Mironov@vsegei.ru, Aleksey_Pugovkin@vsegei.ru

The results of regional work of VSEGEI on uranium in recent years are considered. Areas for the mineragenic and prospecting works are recommended. Passports of prospective objects have been prepared. The estimated resources of uranium P_3 have amounted to 414 thousand tons (VSEGEI). Recommendations for further directions of the work are given.

Введение

Основная информация о региональных закономерностях размещения уранового оруденения на территории РФ поступает в НРС «Роснедра» при ФГБУ «ВСЕГЕИ» по программам «Госгеолкарта-1000/3» и «ГДП-200/2», в соответствии со «Стратегией развития минерально-сырьевой базы РФ до 2035 г.». Самостоятельные мелкомасштабные прогнозно-металлогенические работы на уран с 2014 г. в РФ не проводятся из-за отсутствия целевого финансирования Федерального Агентства по недропользованию (Роснедра).

Материалы и методы

Сводное и обзорное картографирование. В 2009 г. ВСЕГЕИ с целью обеспечения Государственной программы «Изучение недр и воспроизводство минерально-сырьевой базы РФ» завершил оценку прогнозных ресурсов урана категории P_3 на основе актуализации «Карты урановосности территории РФ» масштаба 1 : 5 000 000 (Ю. Б. Миронов, Г. А. Машковцев, С. В. Бузовкин и др., 2005) [2]. Было выделено 7 урановорудных провинций, а в их пределах 76 урановорудных районов, различных по геологическому строению и изученности урановых объектов, отнесенных к 14 урановорудным формациям [3]. Только 3 из них – урановая в связи с ВТС (стрельцовский тип), урановая терригенная в палеоруслах (витимский и долматовский типы) и урановая в связи с гумбеитами (эльконский тип) представляют известные геолого-промышленные типы [1].

По результатам работ для каждого УРР составлен паспорт перспективного объекта по утвержденному «Роснедра» образцу с оценкой прогнозных ресурсов урана категории P_3. По состоянию на 01.01.2015 г. прогнозные ресурсы урана категории P_3 территории

РФ составили 1550 тыс. т. Эти ресурсы «привязаны» к 20 субъектам РФ на 49 площадях разного типа геологического строения и изученности [5].

В настоящее время в рамках сводного и обзорного картографирования продолжается анализ региональных закономерностей размещения уранового оруденения при составлении «Прогнозно-металлогенической карты РФ» масштаба 1 : 2 500 000 уже на геодинамической основе. По другим направлениям региональных геологоразведочных работ ранее недоступная информация об урановых объектах в связи с открытием геологических фондов с 2011 г. становится неотъемлемой частью комплектов государственных геологических карт масштаба 1 : 1 000 000 и 1 : 200 000.

На инициативе ОГУМРЭ ВСЕГЕИ начиная с 2015 г. проводятся специальные работы по оценке перспектив выявления месторождений урана по материалам геолого-съемочных работ и геологического доизучения площадей на основе изучения отчетов и издательских макетов комплектов государственных карт, представляемых на НРС «Роснедра». Эти работы заключаются в анализе результатов по отдельным листам и структурам при участии специалистов отдела урановой геологии в работе металлогенической секции НРС, пополнении баз данных урановорудных объектов, районов и провинций, оценки и уточнении прогнозных ресурсов P_3 и составлении ежегодных отчетов.

Обсуждение результатов

Мелкомасштабное картографирование. К 2024 г. планируется завершить работы по программе ГК-1000/3. При этом вся территория РФ будет покрыта цифровыми картами масштаба 1 : 1 000 000 третьего поколения. С 2021 г. начинается создание иерархической системы бесшовных карт на группы листов по единым серийным легендам масштаба 1 : 1 000 000. Особый интерес представляет создание карт закономерностей размещения и прогноза (в т. ч. уранового) оруденения с уточнением формационных типов, прогнозных ресурсов P_3 и возможных перспектив открытия новых урановых объектов в экономически освоенных и труднодоступных районах. Данное направление будет являться составной частью работ по созданию новой «Географо-геологической модели территории РФ масштаба 1 : 1 000 000».

Среднемасштабное картографирование (Рис. 1). По результатам анализа материалов ГДП-200/2 прошлых лет на 38 листах под поиски месторождений урана выделено 22955 км^2 перспективных площадей. Ресурсы урана категории P_3 для них соста-

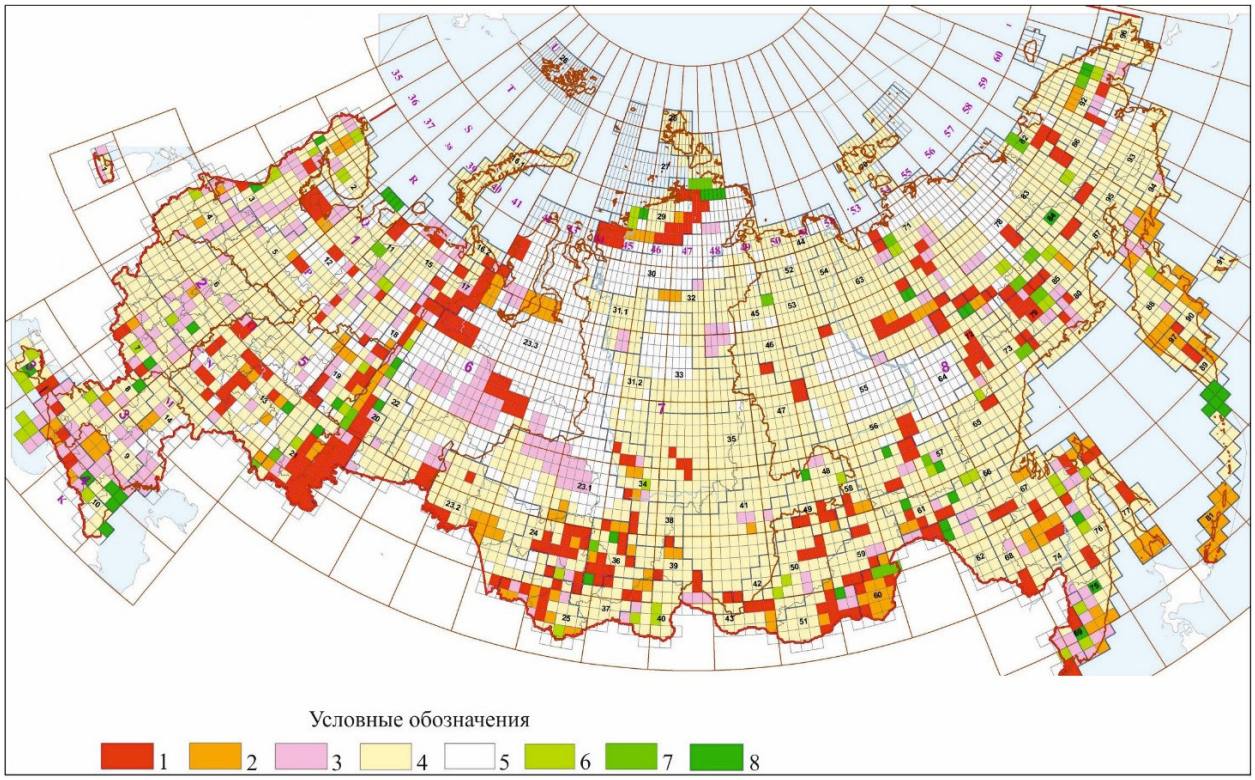


Рис. 1. Схема геологической изученности, ведущихся работ и изданных листов Госгеолкарты-200/2 по состоянию на 15.12.2020 года

1–3. Листы ГК-200 (2-е издание), прошедшие НРС: 1 – электронное издание, 2 – полиграфическое издание, 3 – листы, подготовленные к изданию. 4 – листы ГК-200 (1-е издание); 5 – Госгеолкарта не составлялась. 6–8. Работы по созданию ГК-200/2, ведущиеся в 2020 году: 6 – ГДП-200, 7 – оценка изученности, 8 – составление и подготовка к изданию комплектов Госгеолкарты-200/2.

вили: учтенные в базе ВСЕГЕИ 414 тыс. т, авторские 257 тыс. т, апробированные в ВИМСе – 130 тыс. т. Ежегодно в производстве Роснедра находится до 150 листов масштаба 1 : 200 000, из них более 50 листов завершаются изданием традиционных комплектов геологических карт и карт по результатам ГДП-200 в электронном виде. По своей сути этот вид работ в какой-то мере является для ВСЕГЕИ прямым участием в изучении ураноносности территории РФ, заменяя в сокращенном виде «массовые поиски», обеспечивающие ранее учет, контроль и анализ результатов геолого-съемочных работ.

Уменьшение «задела» поисковых площадей главных видов полезных ископаемых, в т. ч. и урана, ставит задачу изменения методики проведения ГДП-200/2. С 2020 г. по ряду листов в проектах ГДП-200 введен специальный подготовительный этап (1 год), включающий анализ ранее проведенных работ, а также обязательное создание опережающих аэрогеофизических и геохимических основ для проведения среднемасштабного геологического картирования. Данное обстоятельство позволяет использовать эти материалы при проведении поисковых работ на уран в пределах перспективных площадей.

Прогнозно-металлогенические исследования масштаба 1 : 50 000 – 1 : 25 000 являются новым видом работ, предлагаемым к производству с 2022 г. на основе новой классификации месторождений полезных ископаемых и актуализированной стадийности ведения геологоразведочных работ с задачей локализации прогнозных ресурсов категории P_2. К сожалению, обсуждавшийся не один год вид специальных региональных работ «Геолого-минерагеническое картирование масштаб 1 : 200 000» по проектам «Роснедра» не нашел поддержки и не был реализован на практике в течении 5 последних лет.

Следует подчеркнуть, что планами «Роснедра» и «Росатома» неоднократно отмечалось, что для повышения эффективности поисковых работ на уран следует восстановить ранее утвержденную стадийность геологоразведочных работ и обязательное выполнение опережающих региональных прогнозно-металлогенических исследований в слабо изученных регионах и подготовку под поиски перспективных площадей на основе специализированных прогнозно-металлогенических работ в известных рудных районах до начала их проведения.

Для выполнения крупномасштабных прогнозно-минерагенических исследований в ближайшее время будут разработаны методические рекомендации по проведению прогнозно-минерагенических работ масштаба 1 : 50 000 – 1 : 25 000, направленные на выделение перспективных площадей и локализацию прогнозных ресурсов урана категории P_2.

Проведенный анализ фактической ураноносности территории Российской Федерации, результаты специализированных прогнозно-металлогенических работ на уран, а так же данные, полученные в ходе составления государственных карт ГК-1000/3, ГК-200 и ГДП-200 позволяет уже сегодня определить новые площади для постановки прогнозно-геологических исследований на известные и нетрадиционные типы уранового оруденения.

Совместным решением «Роснедра» и «Росатома» (2015) обоснованно указывалось на необходимость проведения поисковых работ на слабо изученных территориях Сибирского и Дальневосточного ФО с обоснованием и выделением новых урановорудных районов и узлов с прогнозными ресурсами урана категории P_3 400 тыс. т.

В качестве перспективных площадей, содержащих урановое оруденение, можно рассматривать следующие территории.

Северо-Эльконская площадь – охватывает северную область погружения Алданского щита под чехол Сибирской платформы и характеризуется урановыми объектами различной формационной принадлежности (месторождения типа несогласия, а также рудными объектами в чехле платформы в связи с мезозойским магматизмом), в т. ч.:

Учуро-Майский (Учуро-Улканский) ПУРР [4]. Одна из слабо изученных территорий, где известны объекты ранга месторождений и проявлений пяти урановорудных формаций:

- золото-ванадий-урановой в зонах нижнерифейского и нижнепротерозойского структурно-стратиграфических несогласий и в породах платформенного чехла в связи с рифейской эпохой активизации протоплатформы (рудопроявления урана: Верхние Конкули, Адаргай, Конкулинское, Угдан и Топорикан);
- молибден-урановой в субвулканических интрузивных и жерловых образованиях в протерозойских миогеосинклинальных прогибах (рудопроявление урана Элгэтэ);
- редкоземельно-редкометальной торий-урановой в альбититах в связи с орогенными щелочными гранитоидами в протерозойских миогеосинклинальных прогибах (рудопроявления урана Боковое, Улкан, Тангутка, Бугуньдья);
- фосфор-урановой золотоносной в альбит-хлорит-карбонатых метасоматитах – эйситах и эйситизированных породах кристаллического фундамента (месторождение урана Тавитчак, рудопроявления Хайкан, Бэрандья, Скальное, Промежуточное и Хребтовое);
- редкоземельно-торий-урановой в альбит-кварц-микроклиновых метасоматитах – ортотектитах, пегматоидных гранитах верхнего архея – нижнего протерозоя (рудопроявления Лурикан и Сыньяр).

Прогнозные ресурсы урана категории P_3 по данным ВСЕГЕИ здесь оцениваются около 80 тыс. т.

Тонодский УРР – расположен в северной части выступа Сибирской платформы. В процессе ГДП-200 силами ВСЕГЕИ и предприятия «Иркутскгеофизика»

проведено современное металлогеническое районирование на уран, выделен новый Кагальский урановорудный узел с ресурсами P_3 20 тыс. т (лист O-49-XII).

Буреинский УРР включает Буреинский массив и его западное обрамление. На этой территории известен ряд урановых месторождений Суларинское, Осеннее, Сентябрьское и Молодежное. В крупных ВТС выделено два потенциально урановорудных узла: Каменушинский (240 км^2) и Белоянский (145 км^2). Промышленное гидротермальное оруденение выявлено лишь на месторождениих Ласточка, Светлое, Каменушинское – Каменушинский узел, и на месторождении Скальное – Белоянский узел. Первые три рудных объекта относятся к фтормолибден-урановой формации в аргиллизитах в связи с вулканическими комплексами, а последний (Скальное) принадлежит молибден-урановой формации в березитах в зонах разломов. Прогнозные ресурсы урана категории Р3 этого района по данным ВСЕГЕИ составляют 50–80 тыс. т.

Южно-Новоземельский урановорудный район расположен на южном острове архипелага Новая Земля с многочисленными проявлениями урана в черносланцевой толще в пределах 150 км полосы (Оленье, Посудинское, Северо-Тайнинское, Рогачевское, Южное). Рудный район требует современной оценки. Прогнозные ресурсы категории P_3 составляют 50 тыс. т.

По мнению ряда геологов, требует постановки опережающих прогнозно-металлогенических и поисковых работ территория восточного побережья РФ, включая Ульинский и Охотский потенциально урановорудные районы.

Ульинский потенциально урановорудный район расположен в южной части Охотско-Чукотского окраинно-континентального вулкано-плутонического пояса и охватывает вулкано-тектонические депрессионные структуры, в строении которых участвуют дацит-риолитовые комплексы мелового возраста. На отдельных участках вулканиты прорываются лейкократовыми гранитоидами. В пределах района выделяются перспективные золоторудная и молибден-урановые рудоносные зоны (Ульинская, Билякчанская и др.), контролируемые крупными разломами, ВТС и выступы метаморфического фундамента. Урановые и золото-урановые рудопроявления приурочены главным образом к экструзивным фациям риолитов и сопровождаются низкотемпературными кварц-каолинит-гидрослюдистыми гидротермальными изменениями. Урановые и золото-серебряные рудопроявления тяготеют к системе Билякчанского регионального разлома. Его урагоносность установлена на отрезке 120 км, где выявлены урановые рудопроявления Амагаран, Атаньджакан, Иникан и др.

Охотский потенциально урановорудный район охватывает фрагмент Охотско-Чукотского вулкано-плутонического пояса, наложенного на структуры срединного массива. Метаморфические комплексы архея и нижнего протерозоя образуют крупные выступы фундамента, за пределами которых они перекрыты осадочно-вулканогенным чехлом различной мощности. Глубинными разломами Охотский срединный массив разделен на крупные блоки. В соответствии с особенностями тектонического строения в срединном массиве выделяются вулканические зоны и ВТС, которым отвечают Куйдусунская урагоносная металлогеническая зона и урановорудные узлы: Западно- и Восточно-Куйдусунский, Юдомо-Охотский, Верхне-Ульбейский.

Общая ресурсная оценка урана категории P_3 охотского побережья по данным ВСЕГЕИ составляет около 100 тыс. т.

Центрально-Тувинский ПУРР предлагается для проведения опережающих прогнозно-металлогенических исследований и поисковых работ на уран. В его пределах известно несколько месторождений различных геолого-промышленных типов с разведанными запасами 50 тыс. т и прогнозными ресурсами категории P_3 около 100 тыс. т. Перспективы вовлечения месторождений Центрально-Тувинского ПУРР в эксплуатацию определяются принятыми решениями формирования Тувинского ЦЭРа. Реализация проекта намечена на ближайшие годы.

С 2022 г. проведение региональных работ планируется по новой программе Роснедра. Практика предыдущих лет показала, что весьма часто поисковые работы на уран проводятся на площадях, не обеспеченных современными геологическими основами масштаба 1 : 200 000. Это Восточно-Саянский ПУРР, Тонодский ПУРР, Присаянский ПУРР, Витимский УРР и ряд других. Хотелось бы, чтобы материалы и рекомендации КНТС были учтены в новой программе развития поисковых работ на уран по контрактам «Роснедра».

Заключение

Полученные результаты рассмотрения и анализа региональных геологоразведочных работ на НРС «Роснедра» свидетельствуют о достаточно высокой эффективности на различные (в т. ч. и уран) полезные ископаемые. Целесообразно их дальнейшее проведение на постоянной основе в качестве самостоятельных объектов в составе научно-методического сопровождения поисковых (на уран) и региональных работ.

Для дальнейшего повышения эффективности изучения урагоносности территорий при ГДП-200 и прогнозно-минерагенических исследований масштаба 1 : 50 000 – 1 : 25 000 в будущем необходимо на стадии проектирования работ в пределах потенциально рудных районов рассматривать уран в качестве ведущего элемента и включать в технические задания проектов специальные виды и объемы работ по выявлению новых урановых объектов и пере-

оценке известных рудопроявлений с подготовкой необходимых геолого-геофизических материалов по локализации прогнозных ресурсов урана категории P_2. Это позволит в короткие сроки увеличить число перспективных площадей на уран и повысить общую эффективность геологоразведочных работ.

Литература

1. Машковцев Г. А., Константинов А. К., Мигута А. К. и др. Уран российских недр. – М., ВИМС, 2010. – 850 с.
2. Миронов Ю. Б., Бузовкин С. В. и др. Отчет по теме «Составление специализированной геологической основы прогнозной на уран карты Российской Федерации с районами проявленности главных факторов формирования уранового оруденения ведущих промышленных типов». – СПб: ВСЕГЕИ, 2005.
3. Миронов Ю. Б., Фукс В. З., Пуговкин А. А. и др. Оценка ресурсного потенциала урана зон древних структурно-стратиграфических несогласий Балтийского, Алданского и Анабарского щитов. Госконтракт № АЛ-01-06/35 от 20.12.2004 г. – ВСЕГЕИ, СПб, 2007.
4. Пуговкин А. А., Миронов Ю. Б. и др. Отчет по теме «Методическое обеспечение и сопровождение составления геолого-структурных, рудно-формационных основ прогнозных на уран разномасштабных карт, переоценка, учет и апробация прогнозных ресурсов урана категории P_3». – СПб: ВСЕГЕИ, 2006.
5. Феоктистов В. П. Отчет по Государственному контракту № АЛ-02-06/24 «Создание системы учета и мониторинга металлогенического потенциала и прогнозных ресурсов категории P_3 территории России и ее континентального шельфа на основе региональных геолого-геофизических и геохимических работ». – СПб: ВСЕГЕИ, 2006.

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА В ЗАБАЙКАЛЬСКОМ КРАЕ

Л. А. Михайлова[1], Б. В. Нимаева[1], С. Э. Лапа[2]

[1]Читинская государственная медицинская академия
Чита, Россия, mihailova-la@mail.ru, s407060@yandex.ru
[2]Управление Роспотребнадзора по Забайкальскому краю
Чита, Россия, svetlapa@km.ru

RADIOECOLOGICAL SITUATION IN THE TRANS-BAIKAL TERRITORY

L. A. Mikhailova[1], B. V. Nimaeva[1], S. E. Lapa[2]

[1]Chita State Medical Academy
Chita, Russia, mihailova-la@mail.ru, s407060@yandex.ru
[2]Department of Rospotrebnadzor for the Trans-Baikal Territory
Chita, Russia, svetlapa@km.ru

The radiation situation on the territory of the Trans-Baikal Territory is satisfactory, except for the territory of the city of Baleya, where radiation contamination of the soil is caused by spills of thorium monazite-containing materials (source sands, concentrates, enrichment tailings, etc.) formed because of the activities of a closed mining enterprise. The average annual effective dose per inhabitant is in the range of 4.6 to 5.2 mSv/year, which is 20.1 % more than the national average. In the structure of the collective annual effective dose of the population of the region, the leading place is occupied by natural and medical sources of ionizing radiation. The contribution to the radiation dose of residents of Baley from natural sources of ionizing radiation is 97.97 %, including from radon-91.34 %, the average annual effective dose is 14.6 mSv/year.

Введение

Радиоактивное загрязнение окружающей среды представляет один из важнейших видов негативного воздействия на организм человека [1]. Целью государственной политики в области обеспечения радиационной безопасности является планомерное снижение до приемлемого уровня техногенного воздействия на население и окружающую среду при использовании атомной энергии и снижение до допустимых норм воздействия природных источников ионизирующего излучения [3]. В настоящее время радиационная ситуация в стране обусловлена воздействием преимущественно природных источников ионизирующих излучений, приоритетным из которых является радон в воздухе закрытых помещений, и медицинскими источниками, при этом имеются территориальные особенности ее формирования. В

Забайкальском крае наиболее неблагоприятная радиоэкологическая ситуация сложилась в г. Балее, где радиационное загрязнение почвы обусловлено просыпями ториевых монацитсодержащих материалов, образовавшихся в результате деятельности ныне закрытого горнорудного предприятия [2].

Материалы и методы

В 2018 г. исследовано 265 проб по показателям суммарной альфа-, бета- активности питьевой воды из источников централизованного водоснабжения в 22 районах Забайкальского края (Балейский, Борзинский, Газимуро-Заводский, Забайкальский, Каларский, Карымский, Красночикойский, Кыринский, Могочинский, Нерчинский, Оловяннинский, Петровск-Забайкальский, Приаргунский, Сретенский, Улетовский, Хилокский, Читинский, Чернышевский, Шелопугинский, Агинский, Дульдургинский, Могойтуйский) и г. Чите. Проведены исследования из подземных источников питьевой воды централизованного водоснабжения на содержание радона в 215 пробах. На содержание природных радионуклидов (^{210}Po, ^{210}Pb, ^{224}Ra, ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{234}U, ^{238}U, ^{228}Th, $^{230+232}$Th) исследовано 11 проб.

Проведены исследования по показателям суммарной альфа-, бета- активности в 116 пробах питьевой воды из источников нецентрализованного водоснабжения в 21 районах Забайкальского края (Александрово-Заводский, Балейский, Борзинский, Газимуро-Заводский, Забайкальский, Калганский, Красночикойский, Краснокаменский, Кыринский, Нерчинско-Заводский, Нерчинский, Петровск-Забайкальский, Приаргунский, Улетовский, Хилокский, Читинский, Чернышевский, Шелопугинский, Шилкинский, Агинский, Могойтуйский) и г. Чите. Исследованы пробы из подземных источников питьевой воды нецентрализованного водоснабжения на содержание радона в 102 пробах. На содержание природных радионуклидов (^{210}Po, ^{210}Pb, ^{224}Ra, ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{234}U, ^{238}U, ^{228}Th, $^{230+232}$Th) исследовано 16 проб. Исследовано 5 проб почвы по показателям цезий-137, стронций-90 и 174 пробы – удельная эффективная активность природных радионуклидов. Число обследованных помещений в эксплуатируемых и строящихся жилых и обследованных зданиях на содержание радона в воздухе (ЭРОА) составило 480.

Результаты и их обсуждение

Средняя годовая эффективная доза для населения региона за счет всех источников ионизирующего излучения в расчете на одного жителя представлена в таблице 1.

Результаты радиационно-гигиенической паспортизации показали, что в структуре коллективной годовой эффективной дозы населения края ведущее мест занимают природные и медицинские источники ионизирующего излучения.

Среднее по региону (за исключением жителей г. Балея) значение вклада в коллективную годовую эффективную дозу облучения населения природными источниками ионизирующего излучения составляет в 2018 г. – 88,52 % (2017 г. – 90,27 %; 2016 г. – 88,29 %; РФ в 2018 г. – 84,90 %). По данным радиационно-гигиенического паспорта за 2018 г. средняя годовая эффективная доза природного облучения на 1 жителя составляет 4,60 мЗв/год (по Российской Федерации – 3,83 мЗв/год), в том числе за счет внешнего гамма-излучения – 0,940 мЗв/год; за счёт радона – 2,380 мЗв/год.

В 2018 г. в результате измерений эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона в воздухе помещений, обнаружено 3 измерения, не соответствующих санитарным нормативам. В г. Балей отмечаются высокие концентрации радона в воздухе жилых и общественных зданий. Вклад в дозу облучения жителей города от природных источников ионизирующего излучения составляет 97,97 %, в том числе от радона – 91,34 %. Средняя годовая эффективная доза на 1 жителя г. Балея составляет 14,63 мЗв/год.

Наибольший вклад в дозу облучения человека природными источниками ионизирующего излучения вносит радон и его короткоживущие дочерние продукты распада в воздухе помещений, что определяет особое внимание к радиационному контролю помещений жилых, общественных и производственных зданий и сооружений. Доля помещений, находящихся в эксплуатируемых и строящихся жилых и общественных зданиях, не отвечающих гигиеническим нормативам по ЭРОА радона, составила 2,9 %. Превышение гигиенического норматива ЭРОА радона для эксплуатируемых жилых и общественных зданий (более 200 Бк/м^3) зарегистрировано в 14 жилых обследованных помещениях г. Балей.

Проб почвы, несоответствующих гигиеническим нормативам по показателям цезий-137, стронций-90, удельная эффективная активность природных радионуклидов, не обнаружено. Средние и максимальные уровни поверхностной активности техногенных радионуклидов стронция-90, цезия-137 в почве не превышают величину радиоактивного загрязнения вследствие глобальных выпадений и составляют 1 – 2 кБк/м^2 и 2–3 кБк/м^2 соответственно.

На территории края имеется участок техногенного загрязнения на территории п. Новотроицк Ба-

Таблица 1. Средняя годовая эффективная доза за 2016–2018 гг. в сравнении с РФ (мЗв/год)

Годы	Забайкальский край	Российская Федерация
2016	4,60	3,76
2017	5,20	3,87
2018	4,60	3,83

лейского района, где радиационное загрязнение почвы обусловлено просыпями ториевых монацит содержащих материалов (исходных песков, концентратов, хвостов обогащения и т. д.), образовавшихся в результате деятельности ныне закрытого предприятия, материалами от разрушенных железобетонных конструкций, радиоактивными строительными материалами, образовавшимися после ликвидации радиационно-загрязненного жилья (проведена рекультивация аномальных зон Новотроицкого карьера).

В регионе в эксплуатации находится 422 источника централизованного водоснабжения. В 2018 г. обследовано 32,7 % источников централизованного водоснабжения по показателям суммарной альфа- и бета-активности. Доля проб питьевой воды из источников централизованного водоснабжения, превышающих контрольный уровень по суммарной альфа- активности, составила 13,6 %, превышение контрольного уровня по показателю суммарная бета-активность не зарегистрировано. В 10 районах края (Балейский, Борзинский, Забайкальский, Красночикойский, Петровск-Забайкальский, Читинский, Чернышевский, Шелопугинский, Агинский, Могойтуйский) и г. Чите зарегистрированы случаи превышений контрольного уровня по суммарной альфа- активности в питьевой воде централизованного водоснабжения. В основном, в пробах воды из подземных источников водоснабжения, которые обусловлены содержанием природных радионуклидов. Доля проб с превышением контрольного уровня по суммарной альфа-активности, в интервале от 0,2 до 0,4 Бк/кг, составило – 4,5 %; свыше 0,4 Бк/кг – 9,1 %. Доля проб воды источников централизованного водоснабжения, превышающих соответствующие уровни вмешательства (УВ) для природных радионуклидов (^{210}Po, ^{210}Pb, ^{224}Ra, ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{234}U, ^{238}U, ^{228}Th, $^{230+232}$Th), составила 4,2 %. Превышения УВ для измеренных природных радионуклидов зарегистрированы в 7 районах (радон-222) – Балейский, Забайкальский, Нерчинский, Петровск-Забайкальский, Хилокский, Читинский, Чернышевский.

В Забайкальском крае в эксплуатации находится 1162 источника нецентрализованного водоснабжения. В 2018 г. обследовано 9,0 % источников нецентрализованного водоснабжения по показателям суммарной альфа- и бета- активности. Доля проб воды, превышающих контрольный уровень по суммарной альфа- активности, составила 36,2 %. Превышений контрольного уровня по суммарной бета-активности в пробах воды не зарегистрировано. В 13 районах края (Александрово-Заводский, Борзинский, Забайкальский, Калганский, Красночикойский, Краснокаменский, Нерчинско-Заводский, Нерчинский, Приаргунский, Улетовский, Чернышевский, Шелопугинский, Могойтуйский) зарегистрированы случаи превышения контрольного уровня по суммарной альфа-активности в питьевой воде нецентрализованного водоснабжения. Доля проб, превышающих контрольный уровень суммарной альфа- активности в интервале от 0,2 до 0,4 Бк/кг, составила – 9,5 %; свыше 0,4 Бк/кг – 26,7 %. Доля проб воды источников нецентрализованного водоснабжения, превышающих соответствующие УВ для природных радионуклидов (^{210}Po, ^{210}Pb, ^{224}Ra, ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{234}U, ^{238}U, ^{228}Th, $^{230+232}$Th), составила 16,6 %.

Превышение УВ для измеренных природных радионуклидов (радон-222), зарегистрировано в 8 районах – Александрово-Заводский, Забайкальский, Красночикойский, Краснокаменский, Нерчинско-Заводский, Нерчинский, Хилокский, Шелопугинский.

По данным радиационно-гигиенического паспорта на территории Забайкальского края проживает 1072,81 тыс. человек. В 2018 г. проведено 1 931 621 медицинских процедур. В среднем на одного жителя Забайкальского края приходится 1,8 рентгенорадиологических процедур, в то время как, на одного жителя РФ это значение составило 1,97. Вклад в коллективную годовую эффективную дозу облучения населения за счет медицинского облучения в 2018 г. составил 11,35 % (РФ – 14,90 %), 2017 г. – 9,62 % (РФ – 14,13 %), в 2016 г. – 11,58 % (РФ – 12,84 %). Средняя эффективная доза за одну процедуру составила 0,29 мЗв/процедуру (РФ – 0,29 мЗв/процедуру). Наибольший вклад в коллективную годовую эффективную дозу медицинского облучения пациентов внесли рентгенографические исследования (27,78 %) и компьютерная томография (47,03 %).

Заключение

Таким образом, радиационный фактор не является ведущим фактором вредного воздействия на здоровье населения Забайкальского края, радиационная обстановка в регионе удовлетворительная, за исключением территории г. Балея.

Литература

1. Белозерский Г. Н. Радиационная экология / Г. Н. Белозерский. – Москва: Издательский центр «Академия», 2008. – 384 с.
2. Замана Л. В. Радиоэкологическая обстановка на площади Балей-Тасеевского рудного поля (Восточное Забайкалье) / Л. В. Замана, В. И. Флешлер Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Международной конференции. – Томск, 2016. – С. 251–254.
3. Ким Д. Радиационная экология / Д. Ким, Л. А. Геращенко. – Братск: ГОУ «БрГУ», 2010. – 213 с.

МНОГОЛЕТНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ ЖИДКИХ СБРОСОВ БЕЛОЯРСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Л. Н. Михайловская, А. В. Коржавин, В. Н. Трапезникова, А. В. Трапезников

Институт экологии растений и животных УрО РАН
Екатеринбург, Россия, mila_mikhaylovska@mail.ru

RESULTS OF LONG-TERM RADIOECOLOGICAL MONITORING OF THE EFFECT ZONE OF LIQUID DISCHARGES FROM THE BELOYARSK NUCLEAR POWER PLANT

L. N. Mikhailovskaya, A. V. Korzhavin, V. N. Trapeznikova, A. V. Trapeznikov

Institute of Plant and Animal Ecology of the UB RAS, Yekaterinburg, Russia, mila_mikhaylovska@mail.ru

The long-term use of the Olkhovsk bog as a natural filter on the way of the liquid discharges of the Beloyarsk NPP and Institute of Reactor Materials led to radionuclide contamination of the Olkhovsk bog-river system turned into a source of secondary pollution. Over the 35 years of operation of the BNPP, the level of pollution of the upper layers of bottom sediments has decreased due to the redistribution of radionuclides with surface runoff, depth migration and radioactive decay. After the reconstruction of discharges the removal of ^{90}Sr and ^{137}Cs into an open hydrographic network decreased by 2–3 times.

Введение

Белоярская атомная электростанция им. И. В. Курчатова (БАЭС) – один из крупных ядерных объектов Уральского региона. Единственная в мире электростанция, на промплощадке которой эксплуатировались энергоблоки разного типа (АМБ-100, АМБ-200, БН-600, БН-800) работает в штатном режиме с 1964 г. Расположенный рядом Институт реакторных материалов имеет исследовательский реактор бассейнового типа ИВВ-2М мощностью 15 МВт (эксплуатируется с 1966 г). Оба предприятия расположены в 42 км к востоку от г. Екатеринбурга на берегу Белоярского водохранилища. Штатная работа реакторов сопровождается контролируемыми газоаэрозольными выбросами и сбросами слаборадиоактивных дебалансных вод; в их составе в окружающую среду поступает целый ряд техногенных радионуклидов: ^{3}H, ^{90}Sr, ^{137}Cs, $^{238,239,240}Pu$. Количество радионуклидов, поступающих в окружающую среду, как правило, на порядки ниже допустимых норм, принятых в отечественных нормативно-методических документах и рекомендациях МАГАТЭ [3, 6]. Это подтверждено многолетними наблюдениями, показавшими, что загрязнение территории наблюдаемой зоны $^{239,240}Pu$ поддерживается на уровне глобального фона (0,03–0,30 кБк/м^2), а ^{90}Sr (1,2–3,0 кБк/м^2) и ^{137}Cs (2,3–6,8 кБк/м^2) – на уровне регионального фона, сложившегося из атмосферных выпадений радионуклидов различного генезиса [4]. Слабое влияние газоаэрозольных выбросов на уровень загрязнения долгоживущими радионуклидами прилежащих территорий отмечено и на других АЭС [3, 5]. В результате деятельности БАЭС и ИРМ загрязненными оказались участки в зоне влияния жидких сбросов предприятий. Территории ИРМ и БАЭС примыкают друг к другу, сбросы ИРМ подаются на очистные сооружения БАЭС. Поэтому влияние этих предприятий на загрязнение окружающей среды разделить невозможно [3].

Материалы и методы

Зона влияния жидких сбросов – Ольховская болотно-речная система (ОБРС) включает в себя низинное торфяное болото с прилегающими заболоченными участками, вытекающую из него р. Ольховку и полосу пойменных почв (рис. 1). Болото расположено в 5 км к юго-востоку от станции, его площадь около 0,3 км^2. Вектор водного стока направлен с запада на восток. В западную часть болота выведен сбросной канал, по которому многие годы поступали слаборадиоактивные дебалансные воды предприятий и сточные воды г. Заречный. В 2007 г. произведена реконструкция системы сбросов. Дебалансные воды через специализированный трубопровод были выведены в нижнюю часть болота. Хозфекальные стоки БАЭС, как и прежде, поступают в верхнюю часть болота. Ольховское болото связано стоком с открытой гидрографической системой через р. Ольховку. Она течет в общем направлении на восток-северо-восток, впадает с левого берега в р. Пышму, которая входит в Обь-Иртышскую речную систему.

При разработке общей концепции радиоэкологического мониторинга в районе БАЭС, учитывали пути поступления и набор загрязнителей, среди которых наибольшее внимание уделяли долгоживущим дозообразующим радионуклидам (^{90}Sr, ^{137}Cs).

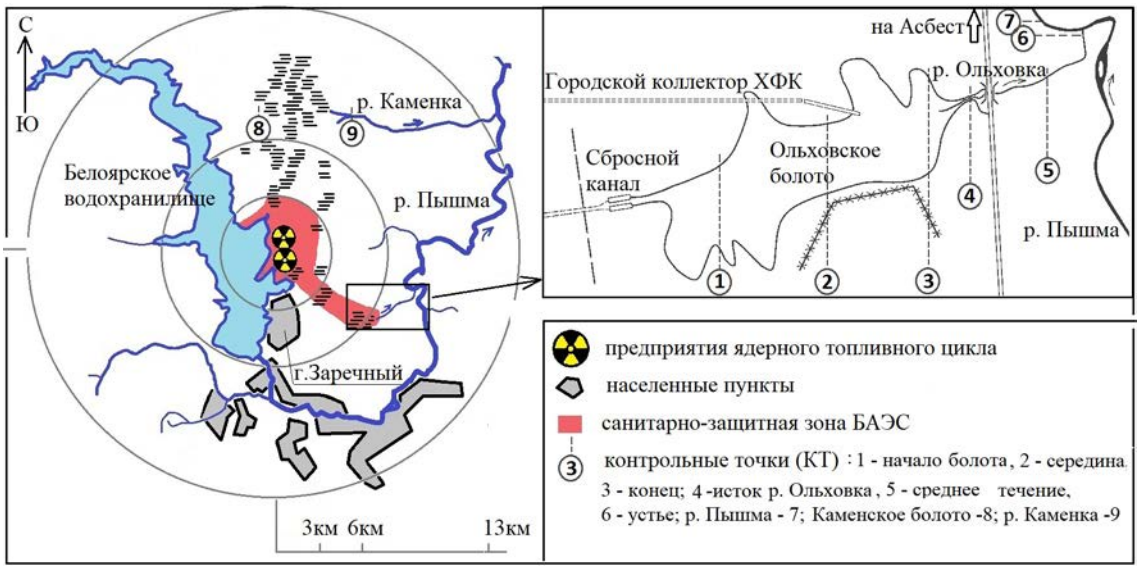


Рис. 1. Схема района исследований

Ольховская болотно-речная система с сопредельным почвенным покровом была выделена в качестве самостоятельного объекта мониторинга. Основная концепция мониторинга изложена в работах [1, 4]. В соответствии с ландшафтно-географической характеристикой ОБРС мы разделили ее территорию на основные элементы (см. рис. 1). Предложенный подход к формированию сети мониторинга позволяет сократить число проб, располагая контрольные точки (КТ) отбора в различных участках системы, определяемых рельефом территории, гидрологическим режимом и связанных стоком. Для исследований выбрали элементы ОБРС расположенные по вектору стока (КТ 1, 2, 3, 4, 7). В качестве контроля использовали Каменское болото (КТ 8) и р. Каменка (КТ 9) расположенные за пределами влияния жидких сбросов БАЭС. В каждой точке отбирали донные отложения, приболотные и пойменные гидроморфные почвы. Для оценки параметров водного стока отбирали пробы воды в КТ 4.

Методики отбора проб окружающей среды и определения долгоживущих радионуклидов, использованные в ходе радиоэкологических исследований, изложены в работах [1, 2, 4].

Результаты и их обсуждение

В период пуска 3-го энергоблока БН-600 (1978–1980 гг.) максимальное загрязнение Ольховского болота было отмечено в верхней части болота в районе впадения сбросного канала (начало болота). Концентрация ^{90}Sr в илистых отложениях достигала 480–3800 Бк/кг, а ^{137}Cs 9000–110 000 Бк/кг. В истоке р. Ольховка концентрация ^{90}Sr в иле снижалась до 60–870 Бк/кг, а ^{137}Cs до 8000–51000 Бк/кг. Совершенствование технологий очистки и ужесточение нормирования сбросов привели к тому, что радиационная нагрузка на Ольховскую болотно-речную систему снижалась с течением времени, а фронт загрязнения болота продвигался по направлению вектора стока [2, 4]. По данным службы внешней дозиметрии БАЭС к 2015 г. радионуклиды равномерно загрязнили поверхностный слой донных отложений болота и верхнего течения р. Ольховка. При этом концентрация ^{90}Sr в них снизилась до 30–100 Бк/кг, а ^{137}Cs до 1000–5000 Бк/кг воздушно сухого вещества [3]. За 35 лет концентрация радионуклидов за счет естественного распада могла снизиться лишь в 2,3 раза. В настоящее время вклад жидких сбросов в загрязнение ОБРС очень мал. Он не компенсирует потерь радионуклидов за счет естественного распада и миграции.

Оценка плотности загрязнения радионуклидами в верхнем 0–30 см слое почв и донных отложений показала, что депонирующие компоненты ОБРС загрязнены ^{90}Sr неравномерно без явно выраженного тренда (рис. 2).

Максимальное содержание радионуклида в донных отложениях составило 12,7 кБк/м^2, что превышает контрольный уровень не более чем в 6 раз. Загрязнение ^{137}Cs донных отложений болота на два порядка выше контрольного уровня. Вся территория болота загрязнена в равной степени, достоверных различий плотности загрязнения на разных участках болота нет (U-тест, n = 6, p = 0,96). Далее она снижается по направлению вектора стока. Загрязнение почв невелико и не выходит за пределы затапливаемой береговой зоны болота. Исключение составляет участок заболачиваемой поймы верхнего течения р. Ольховки, здесь плотность загрязнения ^{137}Cs достигает 942,8 кБк/м^2, а в пойме р. Пышмы снижается на порядок величин. Повышенный уровень загрязнения поймы р. Пышма может быть обусловлен не только стоком из Ольховского болота, но и миграцией радионуклидов с водами реки из Белоярского водохранилища – водоема охладителя БАЭС.

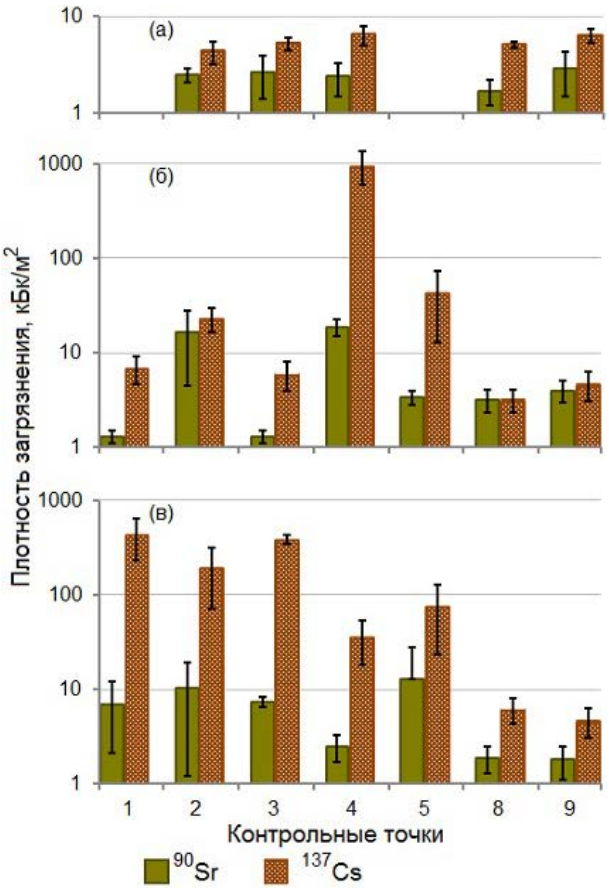


Рис. 2. Плотность загрязнения радионуклидами сопряженных стоком участков Ольховкой болотно-речной системы (а – суходол, б – затапливаемый берег; в – водные системы)

Таблица 1. Вертикальное распределение радионуклидов в торфяно-илистых отложениях болота (1) и аллювиальной торфяно-глеевой почве (2), % от содержания в профиле

Глубина, см	^{90}Sr		^{137}Cs	
	1	2	1	2
0–5	2,48	3,99	0,65	0,95
5–10	13,29	5,40	4,82	0,87
10–15	7,57	5,65	1,75	0,76
15–20	12,13	12,85	2,41	2,41
20–25	4,54	10,55	4,15	11,72
25–30	11,84	18,42	6,78	29,78
30–35	10,90	17,83	12,19	23,97
35–40	11,08	5,23	12,00	9,15
40–50	11,64	12,94	41,14	15,56
50–70	14,51	4,96	14,09	4,14
70–90	–	1,14	–	0,88
90–110	–	0,76	–	1,84

Сопоставление этих результатов с данными, полученными в период пуска блока БН-600 (1978–1985 гг.), показывает, что фронт радионуклидного загрязнения донных отложений продолжает смещаться по вектору стока [1, 2, 4]. Миграция радионуклидов на сопредельную территорию по-прежнему ограничена прибрежной полосой затапливаемых почв.

Изменилось вертикальное распределение радионуклидов в почвах и донных отложениях. Так в 1978–1980 гг. максимальные концентрации радионуклидов наблюдались в верхних слоях донных отложений и почв, а вертикальное распределение характеризовалось плавным снижением с глубиной [4]. На примере наиболее загрязненных элементов ОБРС показано, что через 35 лет ^{90}Sr более или менее равномерно распределился по глубине аллювиальной торфяно-глеевой почвы и торфяно-илистых донных отложений болота (табл. 1). Содержание ^{137}Cs увеличивается с глубиной, достигая максимума на глубине 25–35 см.

Сложившееся за многолетний период функционирования БАЭС пространственное распределение радионуклидов в болотно-речной системе определяется главным образом параметрами водного стока. В 2007 г. был пущен обводной канал и, как следствие, изменился гидрологический режим Ольховского болота. Оценка параметров водного стока, проведена в истоке р. Ольховка до и после реконструкции системы сбросов (рис. 3). Масштабы миграции ^{90}Sr в половодье и межень близки, вынос происходит преимущественно с водорастворимыми соединениями. Большая часть ^{137}Cs перемещается за пределы болота в период половодья, равномерно распределяясь между водой и частицами твердого стока. В меженный период вклад твердого стока снижается. Годовой вынос ^{90}Sr из Ольховского болота с водным стоком за период исследований снизился в 2 раза, а ^{137}Cs в 3 раза и составил $48{,}2 \cdot 10^6$ Бк • год$^{-1}$ и $94{,}8 \cdot 10^6$ Бк • год$^{-1}$, соответственно.

Заключение

За 35-летний период в зоне жидких сбросов Белоярской АЭС фронт радионуклидного загрязнения продвинулся как по горизонтальному, так и вертикальному векторам стока. В настоящее время Ольховская болотно-речная система является источником вторичного загрязнения окружающей среды.

Изменение гидрологического режима болота после реконструкции системы сбросов привело к снижению выноса ^{90}Sr из Ольховского болота с водным стоком в 2 раза, а ^{137}Cs в 3 раза до $48{,}2 \cdot 10^6$ Бк • год$^{-1}$ и $94{,}8 \cdot 10^6$ Бк • год$^{-1}$, соответственно.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН, тема № АААА-А19-119032090023-0.

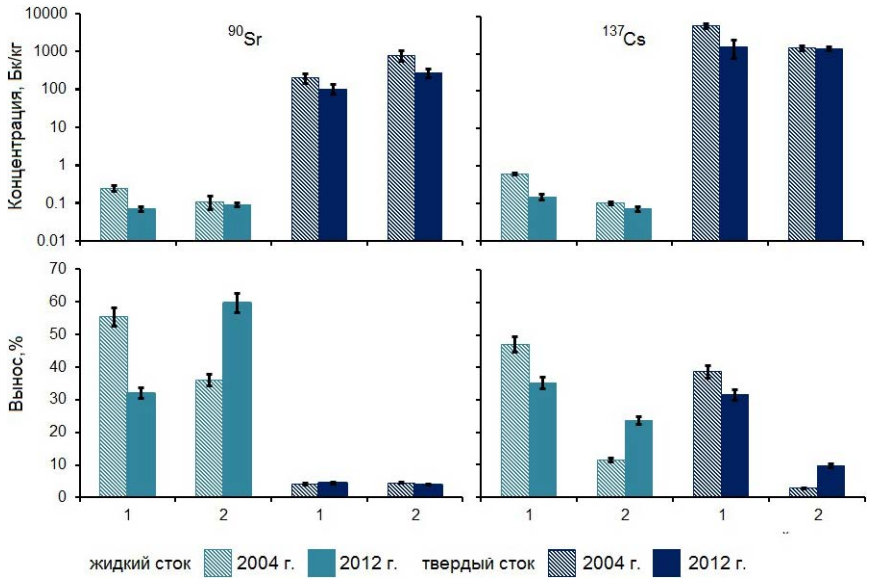


Рис. 3. Параметры выноса радионуклидов в компонентах водного стока до (2004 г.) и после (2012 г.) пуска обводного канала (использованы данные [1, 2]), 1 – половодье, 2 – межень

Литература

1. Михайловская Л. Н. Концептуальная модель и многолетние результаты радиоэкологического мониторинга зоны влияния жидких сбросов Белоярской атомной электростанции / Л. Н. Михайловская, А. В. Коржавин, В. Н. Трапезникова, А. В. Трапезников // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях, 2020. – № 3. – С. 68–75.
2. Молчанова И. В. Итоги многолетних радиоэкологических исследований природных экосистем в зоне жидких сбросов Белоярской атомной электростанции/ И. В. Молчанова, Е. Н. Караваева, Л. Н. Михайловская // Вопросы радиационной безопасности, 2009. – № 4. – С. 19–27.
3. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2014 году : ежегодник / ред. кол.: В. М. Шершаков, В. Г. Булгаков, И. И. Крышев, С. М. Вакуловский, М. Н. Каткова, В. М. Ким, А. И. Крышев. – Обнинск: НПО Тайфун, Росгидромет, 2015. – 346 с.
4. Трапезников А. В. Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах: в 2 т. / А. В. Трапезников, И. В. Молчанова, Е. Н. Караваева, В. Н. Трапезникова. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2007. – Т. 2. – 400 с.
5. Цветнова О. Б. Радиоэкологическая характеристика почвенно-растительного покрова и водных объектов в зоне влияния Нововоронежской атомной электростанции / О. Б. Цветнова, П. М. Якубовская, А. И. Щеглов // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение, 2016. – № 1. – С. 26–31.
6. Sources and effects of ionizing radiation: Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly with scientific annexes. Vol. 1. Sources. – New York: United Nations, 2008. – 463 p.

РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В КОМПОНЕНТАХ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВЬЮН (РЕСПУБЛИКА САХА-(ЯКУТИЯ))

А. Ю. Мишанькин[1], Е. Г. Язиков[1], Е. А. Филимоненко[2], Ю. П. Собянин[3]

[1]Томский политехнический университет
Томск, Россия, andreyka.mishankin@mail.ru
[2]Тюменский государственный университет
e.a.filimonenko@utmn.ru
[3]ООО «Богуславец»
Якутск, Россия, yuri_sob63@mail.ru

RADIOACTIVE ELEMENTS IN THE COMPONENTS OF THE NATURAL ENVIRONMENT OF THE VYUN GOLD ORE DEPOSIT (REPUBLIC OF SAKHA-(YAKUTIA))

A. Yu. Mishankin[1], E. G. Yazikov[1], E. A. Filimonenko[2], Yu. P. Sobyanin[3]

[1]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, andreyka.mishankin@mail.ru
[2]Tyumen State University
e.a.filimonenko@utmn.ru
[3]LLC "Boguslavets"
Yakutsk, Russia, yuri_sob63@mail.ru

The article provides data on the content of radioactive elements (Th, U) in bottom sediments of watercourses, soil cover, bark of daurian larch (*L. dahurica Turcz.*) and reindeer lichen (*Cladonia rangiferina*) in the territory of the Vyun gold deposit (Republic of Sakha-(Yakutia)) at the pre-exploitation stage of its development. Data on the main statistical parameters, characteristics of distribution, correlation of Th and U contents are presented. The contents are compared with clarke levels.

Введение

В настоящее время в Российской Федерации актуальными являются исследования, направленные на расширение ресурсной базы золота и поиски новых золоторудных объектов. Для объектов подобного рода необходимо проведение фоновой оценки состояния окружающей среды, которая учитывает содержания широкого спектра химических элементов в различных компонентах природной среды до начала добычных работ, а также может служить в качестве ориентира при поисковых работах.

В данной работе рассматриваются содержания радиоактивных элементов (Th, U) в компонентах природной среды территории золоторудного месторождения Вьюн (Республика Саха-(Якутия)) на доэксплуатационной стадии его освоения. Работа выполнена в рамках комплексной эколого-геохимической оценки территории месторождения, проведённой сотрудниками кафедры Геоэкологии и геохимии в 2017 г.

Характеристика исследуемой территории

Золоторудное месторождение Вьюн расположено на территории Верхоянского района Республики Саха (Якутия) в 300 км юго-восточнее административного центра – пос. Батагай и в 550 км к северо-востоку от республиканского центра – г. Якутска

Месторождение Вьюн находится в центральной части одноименного рудного поля и открыто в 1974 г. геологом Янской геологоразведочной экспедиции Л. П. Комаровой.

Район месторождения характеризуется среднегорным рельефом, который местами доходит до высокогорного, относится к субарктической зоне с суровым резко-континентальным климатом.

В районе месторождения наблюдается сплошное распространение многолетнемерзлых пород мощностью от 200 до 350 м. Глубина сезонного протаивания грунтов не превышает 1 м.

В геологическом плане золоторудное месторождение Вьюн входит в состав Эльгенджинского рудно-россыпного узла Адычанской золотоносной зоны, которая протягивается в северо-западном направлении на 300 км при ширине до 50 км и занимает меж-

дуречье рек Адыча, Джолакаг, Эльдгенджа, Бурдганджа. В более широком смысле месторождение Вьюн является частью Яно-Колымского пояса

Территорию месторождения слагают терригенные отложения верхнетриасового возраста, которые относятся к периферической части надинтрузивной зоны невскрытого Бурганджинского гранитоидного массива с предполагаемой глубиной залегания кровли гранитоидов до 2 км.

Руды месторождения относятся к малосульфидному золото-кварцевому типу. Основными рудными минералами являются арсенопирит и пирит [1].

Материалы и методы

На территории месторождения опробовались донные отложения водотоков, почвенный покров, кора лиственницы даурской и ягель.

Донные отложения отбирались из четырёх водотоков: ручей Вьюн (6 проб), правый приток ручья Вьюн (2 пробы), левый приток ручья Вьюн (2 пробы), река Бурганджа (3 пробы).

Пробы донных отложений отбирались без стратификации из приводного слоя на участках водотоков с установившимся динамическим равновесием между взвешенными частицами и донными отложениями, при отсутствии смыва последних. Пробоотбор осуществлялся при помощи лопатки из нержавеющей стали. Масса каждой отобранной пробы составляла не менее 1 кг.

Общее количество отобранных и изученных проб донных отложений из водотоков на территории месторождения составило 13 образцов.

Пробы почвы отбиралась с верхнего горизонта (0–10) см методом конверта. Местом отбора каждой индивидуальной пробы почвы являлась площадка прямоугольной формы с размерами сторон от 2 до 10 метров. Индивидуальная проба с каждой площадки представляла собой объединенную пробу, составленную из 5 точечных проб.

Всего было отобрано 19 индивидуальных проб почв.

Пробы коры лиственницы даурской отбирались с нескольких (3–5) взрослых деревьев с 2-х (в случае если диаметр ствола менее 15 см) или 4-х сторон ствола на высоте 1,5 метра от поверхности земли с использованием легкого топорика. При стесывании коры не допускалось попадания в пробу расположенного под корой луба (флоэмы и камбия), т. к. живые ткани дерева малоинформативны по отношению к большинству элементов-индикаторов.

Пункты отбора проб коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) на территории месторождения совмещались с пунктами опробования почвенного покрова. Общее количество отобранных проб коры лиственницы составило 18 образцов.

Биогеохимические пробы ягеля отбирались не менее чем с 4 пробных площадок на каждой точке опробования. Расположение пунктов отбора проб ягеля (*Cladonia rangiferina*) на территории месторождения совпадало с расположением пунктов опробования почвенного покрова и коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*). Общее количество отобранных проб ягеля составило 19 образцов.

Подготовка проб донных отложений к лабораторно-аналитическим исследованиям заключалась в их высушивании до воздушно-сухой массы при комнатной температуре, ручном измельчении и просеивании через сито с размером ячейки 1 мм. Выделенная фракция менее 1 мм измельчалась на микровиброистирателе в лаборатории Отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, после чего упаковывалась в пакеты из крафт-бумаги.

По схожей схеме осуществлялась пробоподготовка образцов почвенного покрова.

Образцы коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) и ягеля (*Cladonia rangiferina*) помещались в пакеты из крафт-бумаги, в которых впоследствии высушивались при комнатной температуре до состояния воздушно-сухого вещества, после чего измельчались.

Для проб почвенного покрова и донных отложений проводился количественный химический анализ на 55 химических элементов (Be, Mg, P, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th и U), для проб коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) и ягеля (*Cladonia rangiferina*) – на 67 химических элементов (Li, Be, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th и U) методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ISP-MC) в аккредитованном химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск).

В данной работе обсуждаются данные по содержаниям радиоактивных элементов в компонентах природной среды (Th, U).

Обработка результатов лабораторно-аналитических исследований проб компонентов природной среды, отобранных на территории золоторудного месторождения Вьюн, заключалась в проведении математико-статистического и эколого-геохимического анализа.

Для выборок по каждому рассматриваемому химическому элементу в составе донных отложений, почв, коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) и ягеля (*Cladonia rangiferina*) была проведена проверка принадлежности его максимального содержания к анализируемой выборке согласно Методическим указаниям [4]. В случае установления ураганных (аномально высоких) концентраций эле-

ментов в образцах, такие концентрации были заменены отвечающие требованиям их принадлежности к анализируемой выборке.

Оценка числовых характеристик содержаний химических элементов в пробах донных отложений, почв, коры лиственницы и ягеля, выполнялась с использованием программного обеспечения Statistica 10.0. В качестве критерия соответствия эмпирического распределения оцениваемых показателей в природных поверхностных водах на территории месторождения нормальному закону распределения использовано отношение показателей асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам [3].

В качестве средних значений содержаний химических элементов в пробах компонентов природной среды принимались средние арифметические значения (в случае, если для исследуемой выборки характерен нормальный закон распределения). В случае, если для выборки устанавливался логнормальный закон распределения, в качестве средних значений использовались средние геометрические.

Таблица 1. Средние по месторождению Вьюн концентрации Th и U и величины Th/U отношения в донных отложениях, почвенном покрове, коре лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) и ягеле (*Cladonia rangiferina*), мг/кг

Показатель	Донные отложения	Почвенный покров	Кора лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*)	Ягель (*Cladonia rangiferina*)
Th	8,18 ± 1,83	6,65 ± 1,76	0,0016 ± 0,0023	0,0109 ± 0,0066
U	2,26 ± 0,26	1,78 ± 0,34	0,0009 ± 0,0010	0,0033 ± 0,0014
Th/U	3,62	3,74	1,78	3,30
Кларк верхней части континентальной земной коры по Григорьеву Н.А., мг/кг [2]				
Th	9,1			
U	2,5			
Средний состав референтного растения, Markert B., мг/кг [5]				
Th	0,005			
U	0,01			

среднее значение ± стандартное отклонение. В случае нормального закона распределения по выборке применялось среднее арифметическое значение, в случае логнормального – среднее геометрическое.

Таблица 2. Основные статистические характеристики концентраций Th и U в донных отложениях, почвенном покрове, коре лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) и ягеле (*Cladonia rangiferina*) территории золоторудного месторождения Вьюн

Хим. эл-т	Среднее, мг/кг	Медиана	Мода	Минимум	Максимум	Дисперсия	A	E
Донные отложения								
Th	8,18	8,1	8,3	5,6	12,0	3,36	0,83	0,32
U	2,26	2,3	2,4	1,8	2,6	0,07	–0,82	–0,24
Почвенный покров								
Th	6,65	6,8	Множ.	1,9	9,0	3,11	–1,27	2,10
U	1,78	1,9	1,9	0,7	2,2	0,12	–2,37	6,33
Кора лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*)								
Th	0,0016	0,0012	Множ.	0,00057	0,0096	0,000005	2,42	6,04
U	0,0009	0,0008	0,0003	0,00025	0,0037	0,000001	1,65	2,24
Ягель (Cladonia rangiferina)								
Th	0,0109	0,010	Множ.	0,004	0,032	0,000044	1,53	3,17
U	0,0033	0,003	Множ.	0,001	0,007	0,000002	1,42	3,03

A – асимметрия, E – эксцесс.

Результаты и их обсуждение

Средние по месторождению Вьюн концентрации Th и U, а также величины Th/U отношения в донных отложениях, почвенном покрове, коре лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) и ягеле (*Cladonia rangiferina*) представлены в таблице 1.

Основные статистические характеристики концентраций Th и U в компонентах природной среды приведены в таблице 2.

Характеристика однородности распределения концентраций исходя из величин коэффициента вариации в донных отложениях, почвенном покрове, коре лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) и ягеле (*Cladonia rangiferina*) представлена в таблице 3.

Коэффициенты парной корреляции между содержаниями Th и U в компонентах природной среды представлены в таблице 4.

Как видно из таблицы, содержания Th и U в исследованных компонентах природной среды во всех случаях значимо положительно коррелируют между собой. Наиболее значимая связь между данными элементами зафиксирована в почвенном покрове.

Величины Th/U отношения в компонентах природной среды исследуемой территории изменяются от 1,78 до 3,74, максимальная величина установлена для почвенного покрова, минимальная для коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) (таблица 5).

Величины кларков концентраций Th и U в компонентах природной среды золоторудного месторождения Вьюн показаны на рисунке 1.

Таблица 3. Характеристика однородности распределения концентраций Th и U в донных отложениях, почвенном покрове, коре лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) и ягеле (*Cladonia rangiferina*) территории золоторудного месторождения Вьюн

Химический элемент	Величина коэффициента вариации	Характеристика распределения	A/δA	E/δE	Закон распределения
Донные отложения					
Th	22	Однородное	1,3	0,3	Нормальный
U	11	Однородное	–1,3	–0,2	Нормальный
Почвенный покров					
Th	27	Однородное	–2,4	2,1	Нормальный
U	19	Однородное	–4,5	6,2	Логнормальный
Кора лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*)					
Th	105	Сильно неоднородное	4,5	5,8	Логнормальный
U	82	Сильное неоднородное	3,1	2,2	Логнормальный
Ягель (Cladonia rangiferina)					
Th	54	Неоднородное	2,9	3,1	Логнормальный
U	43	Неоднородное	2,7	2,9	Нормальный

A/δA – отношение асимметрии и стандартной ошибки асимметрии; E/δE – отношение эксцесса и стандартной ошибки эксцесса.

Таблица 4. Коэффициенты парной корреляции между содержаниями Th и U в донных отложениях, почвенном покрове, коре лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) и ягеле (*Cladonia rangiferina*) территории золоторудного месторождения Вьюн

Компонент природной среды	Величина коэффициента парной корреляции	Уровень значимости	Характеристика связи
Донные отложения	0,74	0,55	Значимая положительная
Почвенный покров	0,90	0,46	
Кора лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*)	0,58	0,47	
Ягель (*Cladonia rangiferina*)	0,86	0,46	

Таблица 5. Величины Th/U отношения в донных отложениях, почвенном покрове, коре лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) и ягеле (*Cladonia rangiferina*) территории золоторудного месторождения Вьюн

Компонент природной среды	Величина Th/U отношения
Донные отложения	3,62
Почвенный покров	3,74
Кора лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*)	1,78
Ягель (*Cladonia rangiferina*)	3,30

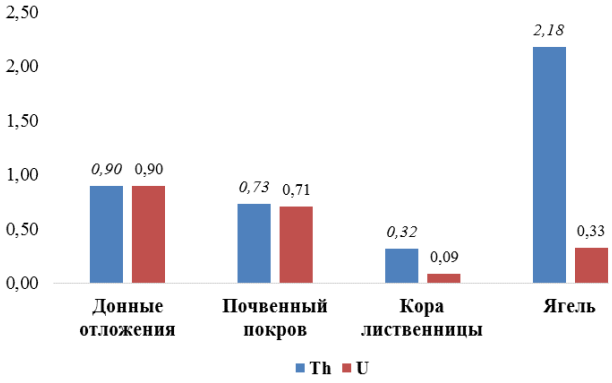


Рис. 1. Величины кларков концентраций Th и U в донных отложениях, почвенном покрове (относительно кларка верхней части континентальной земной коры по Григорьеву Н. А. [2]), коре лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) и ягеле (*Cladonia rangiferina*) (относительно среднего состава референтного растения по Markert B. [5]) территории золоторудного месторождения Вьюн

Кларки концентрации Th и U в почвенном покрове и донных отложениях водотоков рассчитывались относительно кларка верхней части континентальной земной коры по Григорьеву Н. А. [2], а в коре лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) и ягеле (*Cladonia rangiferina*) – относительно среднего состава референтного растения по Markert B. [5].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что средние концентрации Th и U в исследованных компонентах природной среды золоторудного месторождения Вьюн имеют значения ниже кларковых. Исключением является содержание Th в ягеле, для которого установлен кларк концентрации 2,18 ед.

Заключение

Таким образом, в ходе работы установлены уровни содержаний Th и U в донных отложениях водотоков, почвенном покрове, коре лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) и ягеле (*Cladonia rangiferina*) на территории золоторудного месторождения Вьюн (Республика Саха-(Якутия)) на доэксплуатационной стадии его освоения.

Выявлено, что содержания Th и U за редким исключением находятся на уровнях ниже кларковых.

Установленные уровни содержаний радиоактивных элементов являются фоновыми для последующего промышленного освоения территории месторождения.

Стоит отметить, что в основании территории месторождения залегает невскрытый Бурганджинский гранитоидный массив, который может оказывать то или иное влияние на содержание радиоактивных элементов в изученных компонентах природной среды.

Литература

1. Анисимова Г. С. Геологическое строение и состав руд золото-кварцевого месторождения Вьюн, Восточная Якутия / Г. С. Анисимова // Руды и металлы, 2009. – № 5. – С. 59–69.
2. Григорьев Н. А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры / Н. А. Григорьев // Геохимия, 2003. – № 7. – С. 785–792.
3. Михальчук А. А. Многомерный статистический анализ эколого-геохимических измерений. Ч. 2. Компьютерный практикум: Учебное пособие / А. А. Михальчук, Е. Г. Язиков. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – 152 с.
4. Поцелуев А. А. Математические методы в геохимических исследованиях. Методические указания / А. А. Поцелуев, С. И. Сарнаев. – Томск: Изд-во ТПУ, 1994. – 38 с.
5. Markert B. Establishing of 'reference plant' for inorganic characterization of different plant species by chemical fingerprinting | B. Markert // Water, Air, and Soil Pollution, 1992. – № 64 (3). – P. 533–538.

УГЛЕРОДНЫЕ СОРБЕНТЫ В ОБЕСПЕЧЕНИИ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

В. М. Мухин, М. А. Гутникова

АО Электростальское НПО «Неорганика»
victormukhin@yandex.ru

CARBON SORBENTS IN ENSURING RADIATION SAFETY

V. M. Mukhin, M. A. Gutnikova

AO Elektrostal NPO "Neorganika"
victormukhin@yandex.ru

The article reflects the crucial role of active carbons and carbon sorbents based on them in the purification of air emissions from nuclear power plants and ensuring the radiation safety of adjacent territories. The need for new promising sorbents is justified and the direction of their synthesis is shown. A carbon sorbent based on anthracite was obtained and its efficiency in the purification of nuclear power plant waste gases from iodine radionuclides was shown.

Введение

Атомные электростанции (АЭС) являются важной альтернативой углеводородной энергетике. С другой стороны, необходимо принимать серьезные меры по очистке отходящих газов АЭС от радиоактивного йода и радиоактивных инертных газов криптона (Kr) и ксенона (Xe), т. к. радиационное загрязнение территорий наносит наиболее сильный ущерб биосфере в ряду других глобальных техногенных факторов, влияющих на ее безопасность (разливы нефти на суше и на море, загрязнение почв химическими веществами и пестицидами, угнетение почв кислотными дождями и разрушение атмосферы.

Российская Федерация является одним из мировых лидеров в выработке атомной энергии, строительстве новых АЭС как в России, так и за рубежом. По имеющейся информации, озвученной на одном из форумов Росатома генеральным директором А. Лихачевым, в ближайшие годы планируется вдвое увеличить производство электроэнергии за счет строительства новых АЭС и ввода новых энергоблоков на действующих АЭС. И здесь встает важный вопрос об обеспечении АЭС сорбентами для улавливания выделяющихся газообразных радионуклидов, разработанных на новых принципах и в достаточном объеме.

Проблемы глобального загрязнения окружающей среды поднимались еще раньше российским ученым, профессором МХТИ им. Д. И. Менделеева Н. В. Кельцевым, предложившим магистральный путь разрешения ситуации. Он писал: «В настоящее время, когда вопрос жизни и смерти стоит уже не только перед армией, но и перед всем человечеством, обеспокоенным катастрофическим загрязнением биосферы, настало время вновь обратиться за помощью к адсорбции – одному из самых эффективных методов защиты окружающей среды от загрязнений» [1].

В силу своих физико-химических свойств углеродные адсорбенты (активные угли) являются уникальными и идеальными сорбционными материалами, которые позволяют решать большой круг вопросов обеспечения экологической безопасности человека, окружающей среды и инфраструктуры.

Активные угли (АУ) – это высокопористые материалы, получаемые в виде зерен или порошка на основе различного углеродосодержащего сырья, обладающие развитой внутренней поверхностью (до 2500 $м^2/г$) и имеющие высокие поглотительные характеристики по примесям, находящимся в очищаемых средах (в воздухе, газах, воде и других жидкостях, почве). В пористой структуре активного угля (объеме микропор и мезопор) происходит поглощение любых типов органических микропримесей за счет адсорбционных сил (сил поверхностного взаимодействия).

В качестве исходного сырья для получения таких АУ могут использоваться различные углеродосодержащие материалы, такие как каменные угли, торф, древесина, скорлупа орехов и косточки плодов, различные отходы растениеводства (солома различных сельхозкультур и др.) [2].

Материалы и методы

Сорбент для решения задач улавливания радиоактивных газов и паров должен иметь развитую структуру тонких микропор, т.е. иметь объем микропор с размерами 10–14 А не менее 0,35 $см^3/г$. Для этих целей в период начала работ по очистке газовых выбросов АЭС подходил только один тип выпускаемого отечественной промышленностью активного угля – СКТ, изготавливаемого методом химической сернисто-калиевой активации торфа. Поэтому в АО ЭНПО «Неорганика» (тогда ЭНИТИ) были разработаны поглотители СКТ-ЗИ и СКТ-ЗИК на основе активного угля СКТ-3 путем импрегнации основы ги-

дрофобизирующей добавкой триэтилендиамина (ДАБКО) и/или йодидом металла I и II групп таблицы Д. И. Менделеева. Их производство было освоено на Электростальском химико-механическом заводе. Данные сорбенты поставлялись широкому кругу потребителей вплоть до 2008 г., когда производство торфяных углей СКТ было полностью закрыто [3].

АО «ЭНПО «Неорганика» совместно с ГНЦ РФ «ФЭИ им. А. И. Лейпунского» разработало новый тип сорбента на основе уплотненного растительного сырья (скорлупы орехов и косточки плодов) для поглощения газообразных радионуклидов марки ВСК-5ИК (ТУ 2568-374-04838763-2010), который прошел все необходимые согласования в системе Росатома и по своим сорбционным свойствам и прочностным характеристикам существенно превзошел сорбент СКТ-3ИК [4]. В таблице 1 приведены адсорбционные и прочностные свойства данных сорбентов.

Сорбент ВСК-5ИК с успехом поставлялся на ряд объектов Росатома для снаряжения адсорберов АУИ-1500 и УФК-3500У.

Однако технология получения основы для изготовления сорбента ВСК-5ИК - активного угля ВСК-5 – достаточно сложна, т. к. требует проведения операции карбонизации [4].

В 1976 г. академик М. М. Дубинин [5] обосновал, что для обеспечения высокой адсорбционной емкости активного угля, работающего в замкнутом объеме (фильтры, адсорбера и т. д.), важна величина развития объема микропор на единицу объема ($см^3/см^3$), а не на единицу веса ($см^3/г$). Из этого следует, что для обеспечения высокой адсорбционной способности, а, следовательно, и высокого ресурса работы (фильтра, адсорбера и т. д.) надо стремиться к получению АУ с высокой насыпной плотностью. Тогда, даже при низком развитии удельного объема микропор в $см^3/г$, мы будем иметь высокое развитие объема микропор в $см^3/см^3$. Перевод величины удельного объема микропор с $см^3/г$ в объем микропор в $см^3/см^3$ производится путем умножения первой величины ($см^3/г$) на величину насыпной плотности АУ в $г/см^3$.

В настоящее время в АО ЭНПО «Неорганика» (г. Электросталь, Московская область) полностью завершена разработка технологии получения уникального АУ на основе антрацита. В качестве исходного сырья был взят антрацит Горловского месторождения Кузбасса. После дробления кусков антрацита высевали требуемую фракцию 1–3 мм, которую подвергали активации в лабораторной вращающейся электропечи в среде диоксида углерода и водяного пара (в соотношении 1 : 3) при температуре 870 °С, без проведения операции карбонизаци. Активацию проводили до величины обгара 15 % [6].

В таблице 2 приведены технические характеристики активных углей марки ДАС и промышленных углей АГ-3 (Россия, ОАО «Сорбент», на основе каменного угля марки СС) и GCN 830 (Нидерланды, фирма «Norit», на основе скорлупы кокосового ореха).

Очевидно, что адсорбционные свойства ДАС на единицу объема в среднем в 1,5 раза выше, чем у АГ-3, который ранее тоже использовали как основу для получения сорбента для атомной энергетики, что обусловлено его высоким объемом микропор

Таблица 1. Адсорбционные и прочностные свойства сорбентов

Тип сорбента	Динамическая активность по стабильному молекулярному йоду, $г/дм^3$	Коэффициент проницаемости по парам радионуклида йода 131, %	Время защитного действия (ВЗД) по парам бензола, мин	Прочность на истирание (ГОСТ 16188-70), %
ВСК-5ИК	52,6	0,0013	95	91
СКТ-3ИК	50,2	0,0100	62	69

Таблица 2. Технические характеристики активных углей

Показатели	АГ-3	ДАС	На основе кокоса GCN 830
Насыпная плотность, $г/дм^3$	400–500	780	550
Прочность при истирании, %	70–75	80,2	92,0
Содержание золы, %	12–15	2,2	2,4
Объем микропор, V_Σ – $см^3/г$ – $см^3/см^3$	 0,20–0,22 0,09	 0,22 0,17	 0,34 0,19
Адсорбционная активность по йоду, – мг/г – $мг/см^3$	 650–670 297	 600 468	 800 400

на единицу объема ($см^3/см^3$). При этом по своему качеству (за исключением прочности) ДАС находится даже на уровне лучшего мирового аналога GCN 830.

В лаборатории активных углей АО «ЭНПО «Неорганика» в феврале 2021 г. на основе активного угля марки ДАС, полученного на основе антрацита Горловского месторождения Кузбасса в соответствии с технологическим регламентом ВТР 2568-379-04838763-2010, (однако количество импрегнантов было снижено в два раза: йодистого калия 0,75 % против 1,5 %, а триэтиендиамина 1 % против 2 %) был получен образец сорбента ДАС-ИК (типа ВСК-5ИК) для поглощения газообразных радионуклидов йода: I^{131} и CH_3I^{131} (йодистый метил).

В таблице приведены результаты исследования адсорбционной активности по радионуклидам йода полученного опытного образца и промышленного сорбента ВСК-5ИК, а также требования ТУ 2568-372-04838763-2010 на выпускаемый в настоящее время АО «ЭНПО «Неорганика» сорбент ВСК-5ИК.

Вывод: как следует из данных, приведенных в таблице, сорбент ДАС-ИК по сорбции радионуклидов йода не уступает промышленному сорбенту ВСК-5ИК, полученному на основе активного угля из скорлупы кокосового ореха и превосходит требования технических условий на промышленный сорбент ВСК-5ИК на два порядка.

Таблица 3. Сорбционные свойства сорбентов по радионуклидам

Образец	Эффективность очистки (сорбционная активность), %	
	по радионуклиду I^{131}	по радионуклиду CH_3I^{131}
ВСК-5ИК	99,992	99,91
ТУ на ВСК-5ИК	99,9	99,0
ДАС-ИК	99,998	99,97

Результаты и их обсуждение

Как следует из результатов экспериментов, новые типы углеродосодержащего сырья (скорлупа орехов и антрацит) позволяют получать сорбенты с развитым объемом микропор на единицу объема, что позволяет синтезировать сорбенты на их основе с более высокой эффективностью по улавливанию паро- и газообразных радионуклидов, выделяемых при работе АЭС.

Особенно важно то обстоятельство, что новые сорбенты ВСК-5ИК и ДАС-ИК имеют значительно более высокую прочность при истирании, что приводит к резкому снижению пылевыделения из адсорберов.

Таким образом, разработанный новый сорбент ДАС-ИК может с успехом применяться в системах газоочистки на российских АЭС и АЭС, построенных за рубежом по российским технологиям.

Следует также отметить, что технология получения сорбента ДАС-ИК существенно упрощена и включает всего две основные операции дробления антрацита и активацию зерен, что позволит быстро и с малыми затратами организовать его промышленное производство.

Литература

1. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. – М.: Изд-во Химия, 1976. – 511 с.
2. Мухин В. М. Производство и применение углеродных адсорбентов / Мухин В. М., Клушин В. Н. – Берлин: Изд-во LARLAMBERT Academia Publishing, 2018. – 352 с.
3. Мухин В. М. Новые сорбенты для эффективного поглощения радионуклидов в системах СГО атомных электростанций / В. М. Мухин, С. Н. Соловьев, М. А. Гутникова. – Н. Новгород: Изд-во Атомный проект, 2010. – С. 77.
4. Мухин В. М., Гутникова М. А., Гутников С. И. Новый перспективный сорбент для поглощения радионуклидов йода-131 для систем газоочистки АЭС / В. М. Мухин, М. А. Гутникова, С. И. Гутников // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Международной конференции. – Томск, 2016. – С. 450–452.
5. Дубинин М. М. Научные основы путей развития производства активных углей / М. М. Дубинин. – М.: Изд-во ИФХ РАН, 1976. – 45 с.
6. Заявка № 2013102785, 23.01.2013. Мухин В. М., Соловьев С. Н., Дубовик Б. А., Пупырев Е. И., Лимонов Н. В., Сотникова Н. И., Учанов П. В. Способ получения активного угля на основе антрацита // Патент России № 2518964. 2014. Бюл. № 16.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УРАНА И ТОРИЯ В ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ВОДАХ (НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТОВ ЗАПАДНОЙ И ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ)

И. Н. Мягкая, Б. Ю. Сарыг-оол, И. С. Кириченко, В. И. Малов, М. А. Густайтис, Е. В. Лазарева

Институт геологии и минералогии СО РАН
Новосибирск, Россия, i_myagkaya@igm.nsc.ru

URANIUM AND THORIUM DISTRIBUTION IN NATURAL AND MAN-MADE WATERS (OBJECTS OF WEST AND EAST SIBERIA)

I. N. Myagkaya, B. Yu. Saryg-ool, I. S. Kirichenko, V. I. Malov, M. A. Gustaitis, E. V. Lazareva

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
Novosibirsk, Russia, i_myagkaya@igm.nsc.ru

It was presented the total contents of U and Th and their speciation (dissolved with colloidal species and is adsorbed on suspended particles) together with Th/U in natural (rivers, lakes) and man-made (acid mine drainage (AMD), temporary flows at tailings and deposit) waters. The surface waters of three territories was studied: Kurai mercury zone (KRZ; Republic of Altai), Ursk ore field (URP; Kemerovo region), Saralinsky gold ore cluster (SZU; Republic of Khakassia). KRZ and SZU surface waters have a positive U/mineralization dependence by the effect of HCO_3 content. The AMD of URP have maximum contents of U, Th and Th/U. Values of Th/U in all waters indicate their uranium nature. Uranium migrates in dissolved with colloidal species. Thorium is associated with suspended particles excluding the AMD of URP, where Th is as dissolved with colloidal species.

Введение

Гидросфера является важной средой миграции Th и U [7]. Их поведение отличается между собой в экзогенных условиях: Th обладает невысокой способностью к миграции в водах в окислительной обстановке зоны гипергенеза; U, наоборот, в таких условиях мигрирует [12]. Миграционные свойства Th и U отличаются в средах с разными pH-Eh-условиями; в частности, колебания Eh имеют бóльшее влияние на трансформацию форм нахождения U, чем колебания pH [3].

Природные воды (речные, озерные) существенно отличаются по геохимическим характеристикам (pH–Eh, минерализация, содержания и формы нахождения элементов и т. д.) от техногенных, формирующихся в ходе горнодобывающей деятельности [15]. При изменении окислительно-восстановительных условий среды и при наличии/отсутствии геохимических барьеров возможно накопление/миграция элементов. В воде любой элемент может мигрировать в истинно растворенной, истинно растворенной вместе с коллоидами и взвешенной формах [16]. Актуальность исследования U и Th в водах обусловлена, во-первых, тем, что от формы нахождения элементов в компоненте экосистемы зависит миграционная способность элемента, его подвижность или фиксация (особенно при наличии геохимических барьеров), а также их биодоступность. Во-вторых, элементы, поступая в водную систему, способны осаждаться в донные отложения с их захоронением с глинистыми частицами или органическим веществом. Знания о взаимоотношении форм нахождения и основных геохимических параметров (минерализации, концентрация главных ионов и сопутствующих элементов) могут указывать на источник поступления элементов [11], а также предполагать возможные геохимические процессы в водной среде. Цель – выявить особенности миграции Th и U в природных и техногенных водах в зависимости от состава вод.

Материалы и методы

Исследования проводились на 3 территориях, характеризующихся повышенным природным фоном Hg или использованием элемента в технологическом процессе. Исследованы некоторые водоёмы Курайской ртутной зоны (КРЗ; Улаганский и Кош-Агачинский районы, Республика Алтай, Западная Сибирь) [2]. В районе п. Акташ располагается заброшенное Акташское горно-металлургического предприятия (АГМП) одноименного месторождения Hg. В районе п. Чаган-Узун известны как Hg, так и полиметаллические рудопроявления; здесь располагаются коры выветривания вулканогенных отложений, известные для туристов как «Марс». В районе п. Акташ опробованы: р. Ярлы-Амры вблизи АГМП и временные потоки, формирующиеся в районе шахт во время снеготаяния; р. Чибитка (выше и ниже устья р. Ярлы-Амры); оз. Гейзерное. В районе п. Курай: р. Ортолык. В районе п. Чаган-Узун: р. Чаган-Узун; р. Ак-Кая; р. Талду-Дюргун; р. Кызыл-Чин. Восточнее от п. Чаган-Узун – р. Тыд-Туярык. Также опробована р. Катунь в районе смотровой площадки «Слияние рек Чуя и Катунь». Река Чуя опробована от места слияния с р. Катунь до п. Кош-Агач; участок разделен на 5 опорных точек (1 – западнее п. Акташ;

2 – между п. Акташ и п. Курай; 3 – между п. Курай и п. Чаган-Узун; 4 – между п. Чаган-Узун и п. Ортолык; 5 – п. Кош-Агач).

Также изучены водотоки и водоёмы расположенные в пределах Урского рудного поля (УРП) в районе Ново-Урского полиметаллического колчеданного месторождения Салаирского кряжа и его хвостохранилища отходов цианирования (п. Урск, Гурьевский район, Кемеровская область, Западная Сибирь). Отходы цианирования складировались в естественном логу в 2 отвала – отходы первичных руд и отходы руд зоны окисления. Природный ручей дренирует отвалы, превращаясь в кислый дренажный ручей (КДР) [15]. Опробовались реки Ур и Дмитриевка, а также вода затопленного карьера и КДР.

Третья изученная группа водных объектов расположена на территории Саралинского золоторудного узла (СЗУ; п. Приисковый и п. Орджоникидзевский, Орджоникидзевский район, Республика Хакасия, Восточная Сибирь). Месторождения СЗУ золото-сульфидно-кварцевого типа; руды обогащались методами гравиконцентрации и флотационной концентрации, с переработкой гравиконцентратов амальгамацией, а затем цианированием. Посёлок Приисковый располагается в непосредственной близости от горных выработок, рядом с рудничным хозяйством, россыпями и хвостохранилищем [6]. Опробованы реки Богоюл, Сарала, Правая Сарала, техногенные ручьи Саралинского хвостохранилища, природные ручьи за его пределами (Каскадный, Безымянный, Ненастный) и Ивановские озера.

Опробование вод КРЗ проводилось в несколько сезонов (октябрь 2018 г., апрель и июнь 2019 г., сентябрь 2020 г.); вод УРП и СЗУ – в июне 2019 г. pH и Eh вод измерялись в полевых условиях (Анион 7051, «Инфраспак-Аналит», Россия). Содержания взвешенных (susp) и растворенных с коллоидами (dc) форм нахождения U и Th изучались путем фильтрования вод через мембранные фильтры (размер пор 0,45 μm, *Sartorius Stedim*, Германия). Фильтры со взвесью разлагались смесью минеральных кислот (HNO_3 и $HClO_4$). Катионный состав для расчета минерализации (TDS), содержания Th и U пробах природных вод и аликвотах после разложения фильтров определялись методом ИСП-МС (Agilent 7500 ce, «Agilent Technologies», США). Анионный состав вод изучался методом капиллярного электрофореза (Капель 103Р, «Люмэкс», Россия). Для каждого из водоемов рассчитывались средние содержания Th_{dc}, Th_{susp} и U_{dc}, U_{susp}, а также pH и Eh.

Результаты и их обсуждение

Воды рек и озер КРЗ согласно геохимической классификации природных вод холодные, слабо-/сильнощелочные (pH 7,17–9,13), ультрапресные/пресные (TDS 0,1–0,7 г/л), Ca–Mg–HCO_3 состава; Eh изменяется в пределах +304/+560 мВ. Валовое содержание U_{total} в природных водах КРЗ широко варьирует U_{total} (0,072–3,5 мкг/л), как и Th_{total} (0,0005–1,38 мкг/л). Более высокие значения U_{total} установлены в двух реках Чаган-Узунской части КРЗ – р. Талду-Дюргун и р. Кызыл-Чин, а также в оз. Гейзерное (Акташская часть КРЗ); в р. Катунь – наиболее низкие его содержания; в остальных опробованных реках значения содержаний U_{total} колеблются от 0,5 до 1,5 мкг/л (рис. 1). Участок р. Чуя от п. Курай до п. Акташ (рис. 1, Чуя-2) и западнее от п. Акташ до слияния с р. Катунь (рис. 1, Чуя-1) выделяется более высокими содержаниями Th_{total}, которые широко варьируют по течению. Также повышенные содержания элемента наблюдаются в р. Катунь, р. Ортолык, и р. Тыд-Туярык. Для остальных водоемов содержания Th_{total} в среднем не превышают 0,04 мкг/л (рис. 1). Техногенные воды КРЗ в виде весенних временных потоков в районе шахт АГМП значимо не отличаются по геохимическим характеристикам от природных вод, а содержания U_{total} (0,79 мкг/л) и Th_{total} (0,17–0,5 мкг/л) не превышают максимальных значений рек КРЗ (рис. 1).

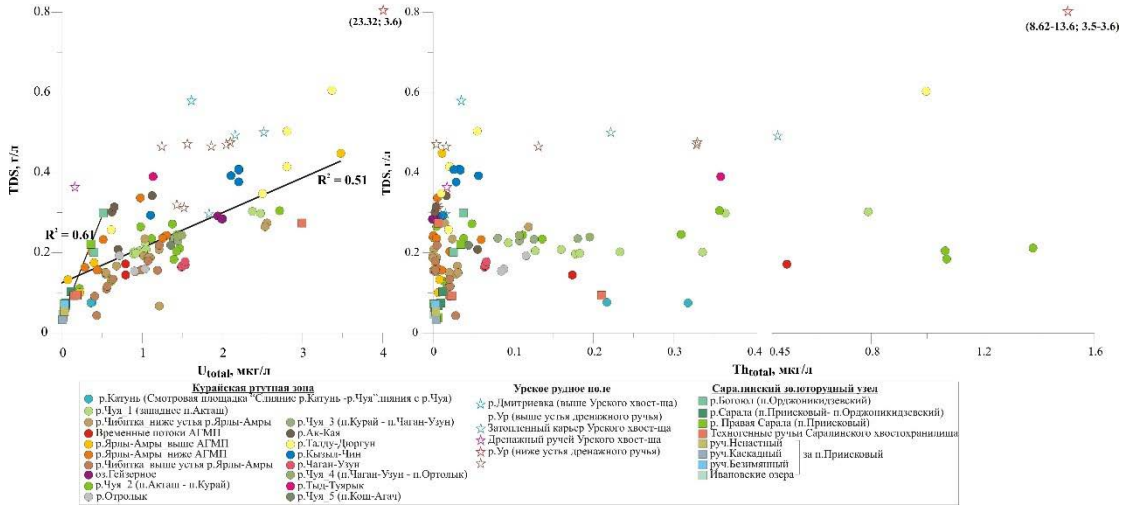


Рис. 1. Зависимость валового содержания U_{total} и Th_{total} от минерализации (TDS)

Реки КРЗ имеют тренд положительной зависимости U_{total} от TDS (рис. 1); последняя определяется содержанием HCO_3-аниона. Зависимость связана с тем, что уранил-ион (UO_2^{2+}) в щелочных водах формирует комплексы с карбонатами и бикарбонатами, обеспечивающие его миграцию в воде [4]. Тренд формируется за счет рек Чуя, Чибитка, Ярлы-Амры, Талду-Дюргун и Кызыл-Чин. Для остальных водоемов КРЗ небольшое количество точек отбора не позволило выявить зависимости TDS-U_{total}. В природных (поверхностные водотоки и водоемы, подземные холодные воды (пресные, солоноватые, углекислые) и термальные) водах юга-востока Алтай-Саянской области показана прямая зависимость U от TDS холодных вод [5]. Для Th_{total} такой зависимости не наблюдается (рис. 1), он в щелочных водах формирует малоустойчивые комплексы ($Th(CO_3)_n^{4-n}$), $Th(OH)^{3+}$, $Th(OH)^{2+}$ и др.), затрудняющие его миграцию [4].

Природные воды на территории УРП относятся к холодным, слабощелочным (pH 7,9–8,2), пресным (TDS 0,49–0,58 г/л) водам, Ca–Mg–HCO_3 состава; Eh составляет +380/+398 мВ. Воды УРП более минерализованы по сравнению с водами КРЗ (основным массивом данных; рис. 1). Для данной системы не наблюдается зависимости содержаний U_{total} (1,24–2,52 мкг/л) и Th_{total} (0,005–0,46 мкг/л) от TDS (рис. 1); содержания элементов сопоставимы со значениями в водах КРЗ. Воды затопленного карьера (pH 8,7, TDS 0,36 г/л) содержат U_{total} (0,16 мкг/л) и Th_{total} (0,02 мкг/л). Техногенный дренажный ручей хвостохранилища характеризуется как кислый (pH 3), солоноватый (TDS до 3,6 г/л), Fe–Al–SO_4 состава; Eh +663 мВ. В ручье существенно выше U_{total} (15,72–23,32 мкг/л) и Th_{total} (8,62–13,6 мкг/л), чем в природных водах (рис. 1). Известно, что сульфат-ионы, присутствующие в водах, способствуют окислению сульфидов [15] и, как результат, в воды высвобождается значительная часть U [10], где уранил-ион формирует комплексы с сульфатами и фторидами [4]. Торий в сульфатных водах может мигрировать как $[Th(SO_4)]^{2+}$, $[Th(SO_4)_2]^0$, $[Th(SO_4)_3]^{2-}$ и др. [4; 9].

Природные воды СЗУ относятся к холодным, нейтральным/слабощелочным (pH 7–8,4), ультрапресным/пресным (TDS 0,04-0,3 г/л) водам, Ca–Mg–HCO_3 состава; Eh изменяется в пределах +273/+550 мВ. Воды данного региона менее минерализованы по сравнению с водами КРЗ и УРП (рис. 1). Содержание U_{total} (0,006–0,51 мкг/л) и Th_{total} (0,001–0,04 мкг/л) в данном районе ниже по сравнению с водами КРЗ и УРП (рис. 1). Для природных вод СЗУ характерна зависимость TDS-U_{total}, как в водах КРЗ. Техногенные ручьи Саралинского хвостохранилища холодные, слабощелочные (pH 7,7–8,4), пресные (TDS 0,08-0,32 г/л) воды, Ca–Mg–HCO_3 состава; Eh изменяется в пределах +365/+586 мВ. В них увеличиваются содержания U_{total} (0,15–3 мкг/л) и Th_{total} (0,006–0,21 мкг/л) в сравнении с природными водами (рис. 1), но не столь значимо как на территории УРП.

Преобладающая формы нахождения U как в природных, так и в техногенных водах КРЗ, УРП и СЗУ – растворенная вместе с коллоидами (рис. 2) за счет способности элемента мигрировать в холодных нейтральных и щелочных водах в виде комплексов уранил-иона с карбонатами, бикарбонатами, сульфатами и гидроксил-ионами. При pH ≥ 8 вторичные и, в меньшей степени, первичные минералы U легко растворяются поверхностными водами. В кислых водах формируются сульфатные и фторидные комплексы, а сами воды легко растворяют любые минералы урана [4].

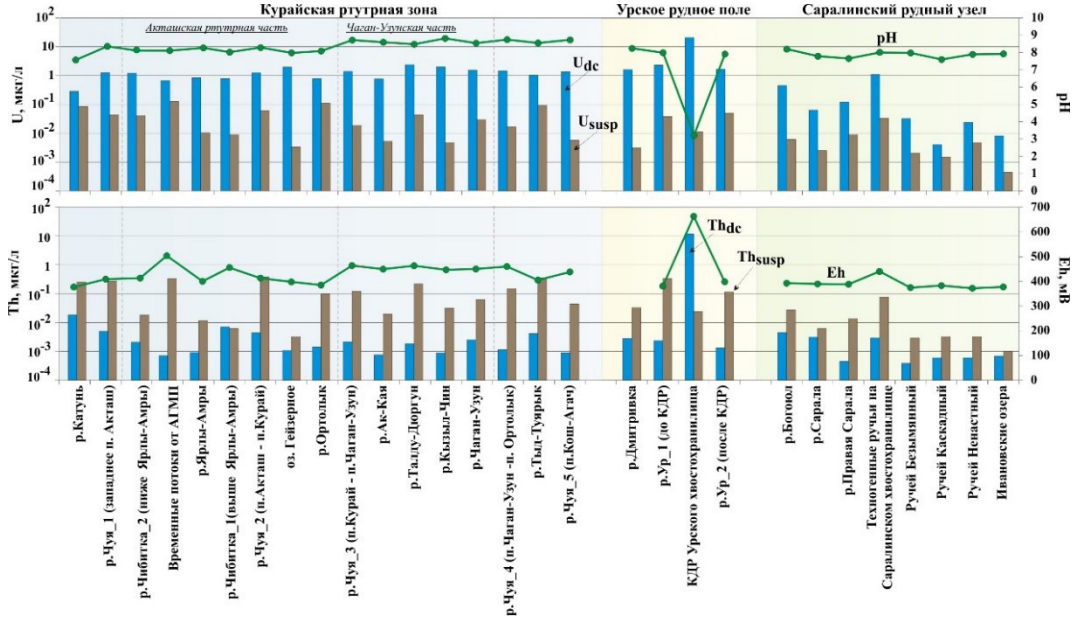


Рис. 2. Средние содержания U и Th (dc – растворенная вместе с коллоидами форма нахождения; susp – взвешенная форма нахождения) в водоемах на фоне pH и Eh

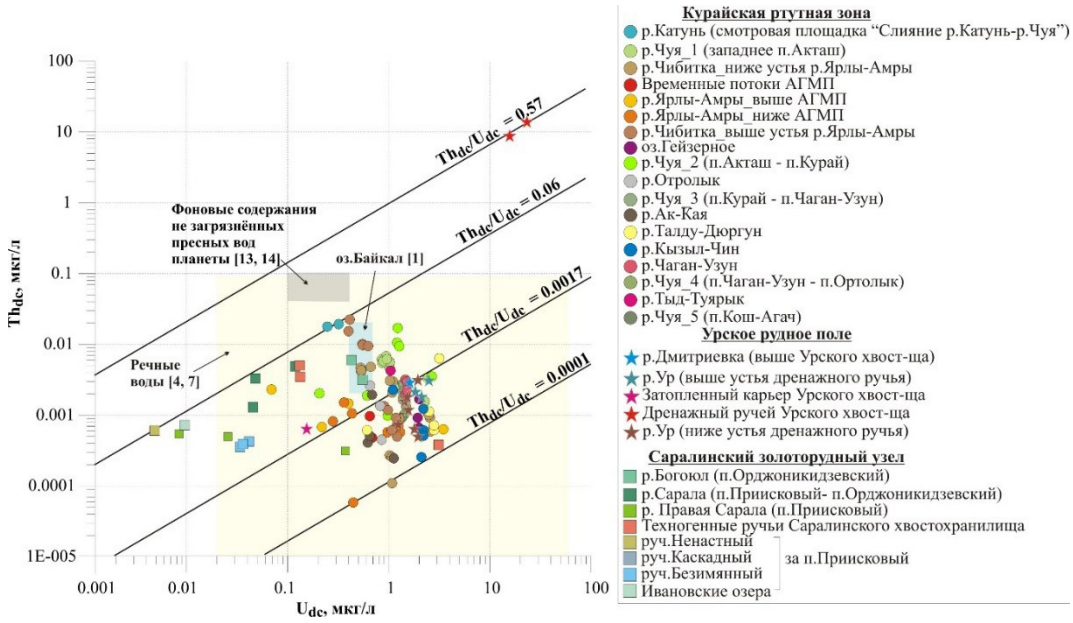


Рис. 3. Th_{dc}/U_{dc} отношение в природных и техногенных водах исследуемых объектов на фоне литературных данных (см. список литературы)

В природных водах всех объектов преобладает Th_{susp}, как и в техногенных, слабощелочных водах КРЗ и СЗУ (рис. 2). В КДР хвостохранилища Ново-Урского месторождения резко преобладает Th_{dc} (рис. 2). Известно, что в речных водах Th переносится в виде взвеси и с обломочным материалом пород. В щелочной среде речных вод Th может присутствовать в составе простых или полиядерных гидроксокомплексов типа $Th(OH)^{3+}$, $Th(OH)_2^{2+}$, $Th(OH)_4^0$ и др. Неустойчивые соединения Th при изменении pH легко гидролизуются. Продукты гидролиза сорбируются на гидроксидах Fe, Mn, Al, коллоидных частицах глинистых минералов и органического вещества. Разбавление сульфатных вод метеорными приводит к понижению концентрации сульфат-ионов, возрастанию pH и гидролизу торий-содержащих комплексов ($[Th(SO_4)]^{2+}$, $[Th(SO_4)_2]^0$, $[Th(SO_4)_3]^{2-}$) [4; 9]. Высокие содержания Thdc в КДР, по-видимому, вызваны достаточно жесткими условиями, а также малым содержанием взвешенного вещества в потоке. Также для КДР характерны повышенные содержания других потенциально-токсичных элементов и благородных металлов в растворенной вместе с коллоидами форме [15].

Содержания U_{dc} и Th_{dc} в природных водах трех исследуемых объектов (КРЗ: 0,069–3,47 мкг/л U_{dc} и 0,00006–0,022 мкг/л Th_{dc}; УРП: 1,24–2,49 мкг/л U_{dc} и 0,0005–0,003 мкг/л Th_{dc}; СЗУ: 0,004–0,5 мкг/л U_{dc} и 0,0003–0,0059 мкг/л Th_{dc}) попадают в диапазон значений, свойственный речным водам ($2 \cdot 10^{-2}$–50 мкг/л U_{dc} [4; 7] и $2 \cdot 10^{-6}$–$n \cdot 10^{-2}$ мкг/л Th_{dc} [4]). Аналогичная ситуация наблюдается для техногенных вод КРЗ (0,65–0,68 мкг/л U_{dc} и 0,0005–0,001 мкг/л Th_{dc}) и СЗУ (0,12–2,9 мкг/л U_{dc} и 0,0004–0,005 мкг/л Th_{dc}). В техногенных кислых растворах Ново-Урского месторождения (15,7–23,3 мкг/л U_{dc} и 8,6–13,5 мкг/л Th_{dc}) содержания Th_{dc} выше значений речных вод [4].

Th/U отношение рассмотрено на примере растворенной вместе с коллоидами формы нахождения, как наиболее мобильной в случае U в гипергенных условиях (рис. 3). В водах КРЗ Th/U отношение широко варьирует 0,0001–0,071; для временных потоков АГМП – в среднем 0,0011. Для речных вод УРП Th/U составляет 0,0002–0,002, тогда как в дренажном ручье увеличивается до 0,54–0,58. Для природных водоемов СЗУ Th/U (0.001-0.15) выше, чем в водах КРЗ и УРП (рис. 3). Техногенные ручьи Саралинского хвостохранилища не отличаются высоки Th/U отношением (0,0001–0,042). Природа радиоактивности воды колеблется от урановой (Th/U < 1), смешанной торий урановой до ториевой (Th/U > 5) [8]. Значения Th/U для всех изучаемых водоемов укладывается в диапазон Th/U гидросферы (0,0001 – ≥ 10) и позволяет говорить о преобладании U над Th, что является классической ситуацией, свойственной гидросфере [7].

Заключение

В природных водах КРЗ и СЗУ наблюдается положительная зависимость содержания U от TDS, которая определяется содержанием HCO_3. Кислые техногенные воды УРП имеют максимальные содержания U и Th, а также Th/U. Значения Th/U в водах всех трех объектов указывают на их урановую природу. Миграция U и Th в водах осуществляется в виде U_{dc} и Th_{susp}, исключая КДР, где преобладает Th_{dc}.

Экспедиционные и геохимические работы частично выполнены в рамках государственного зада-

ния ИГМ СО РАН им. В. С. Соболева. Анализ содержаний Th и U в водах выполнен при поддержке РНФ 18-77-10056.

Литература

1. Ветров В. А. Базовые уровни химических элементов в воде озера Байкал / В. А. Ветров, А. И. Кузнецова, О. А. Склярова // География и природные ресурсы, 2013. – № 3. – С. 41–51.
2. Гаськов И. В. Особенности эндогенной металлогении горного и рудного Алтая (Россия) / И. В. Гаськов // Геология и геофизика, 2018. – Т. 59 (8). – С. 1254–1270.
3. Зуев В. А. Уран в природных водах Западной Сибири: геохимия и техногенез Радиоактивность и радиоактивные элементы в гидросфере / В. А. Зуев // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы международной конференции, посвященной столетию со дня открытия радиоактивности и столетию ТПУ. – Томск, 1996. – С. 120–123.
4. Иванов В. В. Экологическая геохимия элементов: Справочник: Кн. 6: Редкие f-элементы / Иванов В. В. М.: Экология, 1997. – 607 с.
5. Копылова Ю. Г. Уран и торий в природных водах юго-востока Алтае-Саянской области / Ю. Г. Копылова, Н. В. Гусева, К. Д. Аракчаа, А. А. Хващевская, И. С. Мазурова, О. Д. Аюнова, Ч. К. Ойдуп, К. М. Рычкова // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Международной конференции. – Томск, 2016. – С. 339–345.
6. Отчет об инженерно-экологических изысканиях 03-13/2-ИЭИ «Строительство, реконструкция и капитальный ремонт объектов Саралинской ЗИФ», 2014. – 141 с.
7. Рихванов Л. П. Радиоактивность и радиоактивные элементы в гидросфере / Л. П. Рихванов // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Международной конференции. – Томск, 2016. – С. 549–557.
8. Смыслов В. В. Уран и торий в земной коре / В. В. Смыслов – Л.: Недра, 1974. – 232 с.
9. Титаева Н. А. Ядерная геохимия: Учебник / Н. А. Титаева – М.: МГУ, 2000. – 336 с.
10. Торопов А. С. Формы миграции радионуклидов (U и Th) в природных водах в различных геохимических условиях на основе расчетных и экспериментальных данных / А. С. Торопов, Е. А. Солдатова, Л. П. Рихванов // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов, 2020. – Т. 331 (12). – С. 7–21.
11. Чебыкин Е. П. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам / Е. П. Чебыкин, Л. М. Сороковикова, И. В. Томберг, Е. Н. Воднева, С. В. Рассказов, Т. В. Ходжер, М. А. Грачев // Химия в интересах устойчивого развития, 2012. –Т. 20 (5). – С. 613–631.
12. Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза / С. Л. Шварцев. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
13. Gaillardet J. Trace elements in river waters / J. Gaillardet, J. Viers, B. Dupre // Treatise on Geochemistry. New York: Elsevier, 2003. – V. 5 (9). – P. 225–272.
14. Markert B. Inorganic chemical fingerprinting of environment: «Reference freshwater» – a useful tool for comparison and harmonization of analytical data in freshwater chemistry / B. Markert // Fresenius J. Anal. Chem., 1994. – V.349. – P. 697–702.
15. Myagkaya I. N. Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 1: Migration in water flow / I. N. Myagkaya, E. V. Lazareva, M. A. Gustaytis, S. M. Zhmodik // Jour. Geochem. Expl., 2016. – V. 160. – P. 16–30.
16. Wang W. Distribution of heavy metals in water and soil solutions based on colloid-size fractionation / W. Wang, B. Wen, S. Zhang, X. Q. Shan // Int. J. Environ. Anal. Chem., 2003. – V. 83 (5). – P. 357–365.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОФАРМАКОЛОГИЧЕСКОГО ИЗОТОПА Ra^{223}

Н. Р. Неволин[1], В. В. Сохорева[1], С. А. Пластун[1], А. М. Большаков[1], М. С. Черепнёв[1], М. С. Кузнецов[1], А. С. Семенов[2], В. М. Малютин[1], В. В. Зукау[1], Д. В. Кабанов[1], Ф. А. Ворошилов[1], Е. А. Маренкова[1], А. Б. Капитонов[1], И. В. Безденежных[1]

[1]Томский политехнический университет
Томск, Россия, nrn5@tpu.ru, sokhoreva@tpu.ru, kamikaze@tpu.ru, bolshakov@tpu.ru, maxcherepnev@tpu.ru, kms@tpu.ru, mvm@tpu.ru, zukau@tpu.ru, kabanovdv@tpu.ru, fvoroshilov@tpu.ru, eam33@tpu.ru, abk14@tpu.ru, biv_spm@mail.ru
[2]АО «ТомскНИПИнефть»
Томск, Россия, semenovas@tpu.ru

ALTERNATIVE METHODS FOR OBTAINING THE RADIOPHARMACOLOGICAL ISOTOPE Ra^{223}

N. R. Nevolin[1], V. V. Sokhorev[1], S. A. Plastun[1], A. M. Bolshakov[1], M. S. Cherepnev[1], M. S. Kuznetsov[1], A. S. Semenov[2], V. M. Malyutin[1], V. V. Zukau[1], D. V. Kabanov[1], F. A. Voroshilov[1], E. A. Marenkova[1], A. B. Kapitonov[1], I. V. Bezdenezhnykh[1]

[1]TOMSKY Polytechnic University
Tomsk, Russia, nrn5@tpu.ru, sokhoreva@tpu.ru, kamikaze@tpu.ru, bolshakov@tpu.ru, maxcherepnev@tpu.ru, kms@tpu.ru, mvm@tpu.ru, zukau@tpu.ru, kabanovdv@tpu.ru, fvoroshilov@tpu.ru, eam33@tpu.ru, abk14@tpu.ru, biv_spm@mail.ru
[2]AO TomskNIPIneft
Tomsk, Russia, semenovas@tpu.ru

Innovative methods are proposed for the synthesis of «samples-semi-finished» of radioisotopes included in radiopharmacological preparations by irradiation in the channels of particle accelerators. The study touches upon the aspects of obtaining promising substances that are most effectively suitable as materials for target nodes. Further, in one way or another, the obtained radioisotopes are selectively sorbed from the output raw material to achieve the normalized chemical purity.

The prerequisites for obtaining isotopes are given for two directions of nuclear physics methods: neutron activation and bombardment with charged particles.

Введение

Существующие методы синтеза изотопов, составляющих семейство облучаемого, являются действенными, но ограниченными в плане эксплуатационных возможностей установок, формирующих пучок. Перспективно используемый, в данной работе, метод синтеза не является уникальным, но при этом не используется глобально. Речь идёт о ядерном синтезе «полуфабрикатных» образцов радиоизотопов в каналах облучения ядерных реакторов, в альтернативу которому предлагается метод образования радиоизотопов путём облучения в каналах ускорителей частиц.

В рамках данного исследования совместно проводится изучение ряда взаимосвязанных инженерно-технических аспектов:

- планируется произвести конкретизирующий анализ экспериментальных данных для детализирования технических параметров системы генерации облучаемого материала;
- тестирования модуля разделения изотопов Rn^{222} и Ra^{226} посредством десублимации капель из пыле-паро-газовой смеси содержащих твёрдый Ra^{226};
- осуществляется формирование методологии получения материалов, эффективно сорбирующих Rn^{222} и упрощающих его последующую экстракцию. Таким образом, преследуется цель эффективного использования очищенного Rn^{222} для его применения в качестве материала облучаемой мишени при синтезе Ra^{226};
- технико-физических представлений о конструировании мишенных узлов, содержащих сублимированный облучаемый Ra^{226}, представляющий собой материнское сырьё для Ra^{223};
- технико-физических представлений о конструировании мишенных узлов, содержащих сублимированный облучаемый Rn^{222}, также представляющий собой материнское сырьё для Ra^{223}.

В докладе представлены результаты спектрометрического анализа радиофармакологического препарата, состоящего из смеси радиоизотопов, для определения химической чистоты препарата, по содержащимся в спектре характеристических линий Ra^{223} и его дочерним продуктам распада.

Приведён результат анализа литературных материалов, описывающих физические принципы аб-

сорбации, адсорбации и хемоасорбации, а также материалов, непосредственно включающих исследования по методам концентрации радиоизотопа Rn^{222} на конкретных материалах.

Материалы и методы

Выполнено два измерения гамма-спектров пробы препарата (образца) в разное время. Пороговый уровень значимости при поиске пиков 10 %. Первоочередно определено наличие в гамма-спектре характеристических линий Ra^{223} и его дочерних продуктов распада. Для анализа набранных спектров создана библиотека радионуклидов, содержащая линии гамма-излучения Ra^{223} и членов семейства урана (продукты распада радия).

Выполнен альфа-спектрометрический анализ образца. В спектре не идентифицированы характеристические линии, принадлежащие Th^{227}, что говорит о его отсутствии в рассматриваемых образцах.

Выполнен литературный обзор по возможным процессам плазмохимического синтеза наноразмерных оксидных композиций для избирательного извлечения изотопа Rn-222.

Результаты и их обсуждение

На основании уменьшения активности Ra^{223} в 1,6275 раз, в период между снятием спектров, можно сделать вывод, что теоретическое уменьшение активности превышает практическое, а значит возможна генерация изотопа радия из примесных материнских изотопов Th^{227} и Ac^{227}. На возможное присутствие в пробе Th^{227} указывает наличие его основных гамма-линий в спектре, но однозначно установить содержание тория в пробе по данным пикам невозможно, так как вклад в характеристический пик дает линия целевого изотопа радия.

Что касается выбора материала мишени для синтеза Ra^{226} через Rn^{222}, то наиболее перспективными полагаю считать:

- сорбцию в органических растворах – как производство возможного промежуточного продукта;
- высокотемпературный синтез наноразмерных солей соединений радона со фтором;
- низкотемпературную сорбцию углём или его заменителем из кокосовой стружки.

Каждый из перспективных образцов, при воссоздании, будет требоваться поместить в отличный сорбирующий процесс, дабы исследовать зависимость концентрации от вариативности комбинирования методов, а также для установления непрямых зависимостей, значительно влияющих на изменение содержания Rn^{222} в образце.

Заключение

Таким образом в работе выделяются следующие реализуемые направления исследований:

1. Конструирование мишенного узла с Ra^{226} в качестве материала мишени, для синтеза Th^{227}, при облучении мишени в нейтронном канале реактора (см. работу Е. А. Маренковой), с последующим накоплением синтезируемого материала электрохимическим методом (см. работу А. Б. Капитонова).

2. Методы разделения изотопов Ra^{226} и Rn^{222}, генерируемых установкой [3], при участии модуля радиоизотопного разделения десублимацией смеси указанных изотопов, с дальнейшей избирательной сорбцией Rn^{222}.

3. Формирование запечатлённого в криотропном геле твердофазного мишенного материала, содержащего Rn^{222}, для дальнейшего облучения альфа-частицами или дейтронами, в канале ускорителя частиц. Тем самым создаётся сырьё на предмет фундаментальных исследований в области уточнения ядерно-физических констант.

Подведение итогов

Результаты анализа позволили предложить выбор изотопа-мишени для облучения в полях реактора и ускорителя заряженных частиц.

Литература

1. Буткалюк П. С. и др. Получение экспериментальных образцов альфа-излучающих радионуклидов медицинского назначения //Сборник трудов АО ГНЦ НИИАР, 2018. – № 2. – С. 80–92.
2. Кузнецов Р. А., Буткалюк П. С., Буткалюк И. Л., Тарасов В. А., Романов Е. Г, Баранов А. Ю. Получение альфа-излучающих нуклидов облучением ^{226}Ra в высокопоточном реакторе СМ //Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2014. – Т. 16. – № 6. – С. 129–135.
3. Пластун С. А. Установка для получения раствора радона в воде и органической жидкости / С. А. Пластун, Н. К. Рыжакова, М. С. Черепнев // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. Российский и международный опыт подготовки кадров: сборник тезисов докладов X Международной научно-практической конференции, г. Томск, 09–11 сентября 2020 г. – Томск: Ветер, 2020. – С. 127–128.

LREE, MREE, HREE, U И Th – КЛЮЧЕВЫЕ КОМПОНЕНТЫ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ РУД РАЗЛИЧНЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПОВ

А. В. Некипелова, Э. В. Сокол, С. Н. Кох

Институт геологии и минералогии СО РАН
Новосибирск, Россия, nekipelova@igm.nsc.ru

LREE, MREE, HREE, U, AND Th AS A KEY COMPONENTS OF THE DIVERSE RARE EARTH ORES

A. V. Nekipelova, E. V. Sokol, S. N. Kokh

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
Novosibirsk, Russia, nekipelova@igm.nsc.ru

The paper characterizes the contribution of various REE+Y carriers to the ΣREE budget of the Kamysh-Burun through (Cimmerian Kerch iron ore basin). Kerch ores contain Fe^{3+} – (oxy)hydroxides, which adsorbed MREE and abundant rhabdophane-type authigenic phases ($LREE(PO_4) \bullet nH_2O$) enriched in La, Pr, Nd, Ca and depleted in Ce. Opposite to very sporadic detrital monazites, authigenic LREE-phosphates are Th- and U-depleted. Coupling of advanced storage of Pr, Nd and MREE with low Th, and U contents allows one to consider ooidal Kerch ores and their wastes as commercially attractive unconventional REE sources.

Введение

Уникальные свойства редкоземельных элементов (REE) и их соединений определяют их широкое использование в инновационных технологиях и итоговое стратегическое значение. В настоящее время глобальным производителем-монополистом REE является Китай, контролирующий не менее 65 % общего объема мирового рынка. Агрессивная экспортная политика КНР в период 2005–2014 гг. вынудила страны-потребители REE искать собственные источники редкоземельного сырья, включая нетрадиционные. Среди них приоритет принадлежит рудам, связанным с осадочными и гипергенными процессами, это, в частности, угли, латериты, фосфориты, глубоководные илы, Fe–Mn конкреции и осадочные железные руды [1, 5, 12–14]. Современная стратегия добычи REE ориентирована на извлечение руд с максимальными содержаниями «критических» элементов: Pr, Nd, Eu, Gd, Er, Dy и Tb. Традиционные REE руды имеют магматический генезис и резко обогащены Th и U. Их добыча и переработка требует соблюдения строгих мер радиационной безопасности, что приводит к удорожанию коммерческого продута. При оценке рентабельности добычи REE руд и экологических рисков необходим анализ соотношений легких (LREE), средних (MREE), тяжелых (HREE) редкоземельных элементов, а также учет содержаний в них Th и U. В данной работе охарактеризованы фазы-концентраторы REE в керченских железных рудах (КЖР); определены соотношения в них LREE, MREE, HREE, U и Th; выполнено их сопоставление с рудами из иных типов REE месторождений.

Фактический материал и методы исследования

Исследования КЖР осуществлены на материале коллекций с западной и восточной окраин Камыш-Бурунской мульды (карьер «Е» и разрез Аршинцево, соответственно). Петрографические наблюдения и диагностика минералов выполнены методами оптической и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), определение макрокомпонентного состава руд – методом РФА в лабораториях ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). В ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс) выполнен рентгенофазовый анализ пород и определение микроэлементного состава руд и их размерных фракций методом МС-ИСП. Детали методик изложены в [14].

Нормировка содержаний REE и Y в КЖР выполнена на соответствующие их содержания в постархейском австралийском сланце (PAAS) [15] и углистом хондрите (CI) [10]. При анализе спектров распределения REE+Y и оценке соотношения между HREE, MREE и LREE использованы индикаторные отношения $(Yb/La)_{SN}$, $(GdN/La)_{SN}$ [17]; подстрочный индекс «SN» обозначает нормализованную величину. Морфологическая классификация руд дана, согласно [2]. Использованные аббревиатуры: Fe-oxhd = Fe^{3+}–(окси) гидроксиды; IS = железистый иллит-смектит; LREE–phs = аутигенный фосфат LREE.

Характеристика керченских осадочных железных руд

Промышленные месторождения Азово-Черноморской железорудной провинции сосредоточены в мульдах Керченского полуострова: Камыш-Бурун-

ской, Эльтиген-Ортельской и др. Палеогеографическая обстановка и полуаридный субтропический климат в среднем киммерии (N_2^1) благоприятствовали аккумуляции железа в прибрежной акватории сегодняшнего северного Причерноморья. На фоне понтийской (N_1^3) регрессии на этих территориях существовали обширные ландшафты болот, мелководных опреснённых лагун и лиманов. В эти взаимосвязанные системы реками палео-бассейнов Дона, Днепра и др. транспортировался материал латеритных кор выветривания, развитых по породам Украинского щита. На геохимическом барьере, возникающем при смешении пресных речных и лиманно-болотных вод с солоноватыми морскими, происходила массовая коагуляция Fe коллоидов и образование Fe осадков. Частые колебания уровня киммерийского моря и активная гидродинамика прибрежной зоны ответственны за многочисленные эпизоды окисления руд, перемыва и переотложения рудного материала [2].

Типичный разрез керченских рудных толщ сложен пологозалегающими пластами среднекиммерийских железных руд (N_2^1), которые подстилаются известняками понта (N_1^3), и перекрываются куяльницкими (N_2^1-Q_{gl}) и четвертичными (Q_h) отложениями. В рудном интервале чередуются Fe^{3+}–(окси)гидроксидные, Fe-силикатные и Fe–Mn–карбонатные горизонты. Преобладают слабо сцементированные Fe^{3+}–(окси) гидроксидные руды, на 80–95 % состоящие из гётитовых псевдоолитов и/или оолитов, погруженных в цемент, сложенный Fe-силикатами (IS-фаза и продукты её изменения) или родохрозитом (+барит).

Псевдоолиты в керченских рудах имеют неправильную форму, варьируют по размеру (≈ 0,1 мм – 1 см) и содержат многочисленные неокатанные зерна детритовых кварца, кислых плагиоклазов, циркона, монацита и ксенотима размером 5–70 мкм. Псевдоолиты рассечены нерегулярными трещинами, которые не трассируются в узкую кайму обрастания. Такие трещины часто выполняют водные фосфаты LREE. Концентрически-зональные оолиты имеют сферическую форму и размер от 1 мм до 4 см. В их ядрах, обрамленных многочисленными тонкими (~ 10 мкм) концентрами, находятся обломки псевдооолитов, содержащие массивный гетит и фрагменты терригенных минералов. В нерегулярных трещинах, секущих их ядра, также спорадически присутствуют водные фосфаты REE.

Крупные фракции (> 0,25 мм) рыхлых руд практически целиком (до 95 мас. %) состоят из гетита/гидрогетита при минимальном содержании силикатного материала. В составе тонких (≤ 0,25 мм) фракций также преобладает гетит/гидрогетит (60–80 мас. %), однако доля слоистых силикатов может достигать 30 мас. %, а кварца 20 мас. %.

Средний состав керченских Fe^{3+}–(окси)гидроксидных руд (n = 16, в мас. %): SiO_2 – 16,7; Al_2O_3 – 3,9; Fe_2O_3 – 53,6; MnO – 2,4; P_2O_5 – 2,2; CaO – 2,1. Их валовые пробы и грубые фракции содержат умеренные количества ΣREE+Y (367–923 ppm) и бедны Th (2,17–8,93 ppm) и U (0,59–5,28 ppm). Большинство спектров распределения $(REE+Y)_{SN}$ валовых проб руд и их грубых фракций лишены контрастных аномалий, слабо обеднены HREE ($(Yb/La)_{SN}$ = 0,70–1,29) и значимо обогащены MREE ($(Gd/La)_{SN}$ = 1,72–2,41). Обогащение тонких фракций ΣREE (699–3011 ppm, $X_{ср}$ = 1954 ppm, n = 24), главным образом, обеспечивает опережающая аккумуляция в них LREE ($(Yb/La)_{SN}$ = 0,23–0,83) и MREE ($(Gd/La)_{SN}$ = 1,49–2,22).

Характеристика фосфатов REE

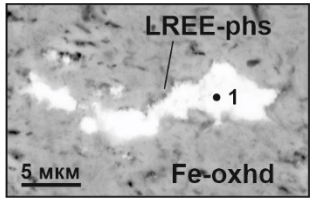
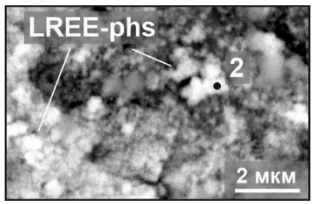
В изученных разрезах фосфаты REE являются обычными акцессорными фазами в рудах всех типов. Окатанные зерна и обломки детритовых монацита и ксенотима единичны и обычно расположены в цементе. Зерна монацита (до 30 мкм) монолитны и не образуют сростков. Их поверхность иногда корродирована, однако инкрустация ее более поздними фазами REE не обнаружена. Мельчайшие зерна детритового ксенотима (≤ 10 мкм) обладают теми же морфологическими особенностями. Для детритовых монацитов характерно следующее соотношение катионов: Ce > La > Nd >> Pr > Th >> U и постоянное присутствие ThO_2 (0,6–8,6 мас. %). Детритовый ксенотим характеризуется следующим соотношением катионов Y >> Dy > Er > Gd ≈ Yb>Ho>Sm ≈ Eu ≈ Tm ≈ Tb.

В тонких фракциях руд присутствуют аутигенные фосфаты LREE, преимущественно локализованные в слепых трещинах, секущих псевдоолиты и оолиты (рис. 1). Все аутигенные фосфаты LREE обогащены Ca (0,4–8,5 мас. % CaO) и характеризуются следующим соотношением главных катионов: Ce > La ≈ Nd ≈ Ca > Pr > Sm; концентрации в них Th и U ниже пределов обнаружения. Атомные отношения ΣREE и P в этих фазах близки к 1 : 1, а постоянный дефицит суммы указывает на присутствие воды. Эти особенности позволяют отнести LREE фосфаты к разряду соединений рабдофанового типа ($LREE(PO_4) \bullet nH_2O$).

По особенностям морфологии и состава аутигенные LREE фосфаты подразделяются на два типа (таблица 1). Первый отличается субмикронными размерами и хлопьевидной формой. Отсутствие серы и умеренное содержание Ca ($X_{ср}$ = 2,8 мас. % CaO, n = 7) позволят квалифицировать его как фазу рабдофанового типа с обобщенной формулой (La 0,03–0,23 Ca 0,02–0,49 Ce 0,01–0,56 Pr 0,00–0,12 Nd 0,00–0,16 Sm 0,00–0,15 Gd 0,00–0,02)$PO_4 \bullet nH_2O$. Присутствие Ca может быть обусловлено существованием ограниченных твердых растворов между рабдофаноподобной фазой ($Ce(PO_4) \bullet nH_2O$) и броккитом (Ca, Ce, Th) (PO_4) • H_2O).

Аутигенные LREE фосфаты второго типа встречаются реже, обладают более крупными размерами (до 2 мкм) и веретенообразной или округлой формой. Они содержат серу (0,4–3,9 мас. % SO_3; $X_{ср}$ = 1,9 мас. %, n = 21), большие количества Ca ($X_{ср}$ = 6,3 мас. %

Таблица 1. Состав и облик аутигенных фосфатов LREE из керченских железных руд

СЭМ-фото в отраженных электронах	Компоненты, мас. %													
Аутигенный фосфат LREE (фаза типа «рабдофан-тристрамит»)														
	Точка	SiO_2	Al_2O_3	FeO	CaO	Ce_2O_3	La_2O_3	Pr_2O_3	Nd_2O_3	Sm_2O_3	Y_2O_3	P_2O_5	SO_3	Сумма
	1	3,83	2,32	19,64	7,16	14,47	7,75	1,78	6,67	<0,3	<0,3	23,72	3,00	90,34
	*	3,70	2,04	17,26	6,91	14,25	7,10	1,47	6,79	<0,3	<0,3	22,25	2,92	84,69
	*	3,87	1,85	6,01	4,34	20,77	11,48	2,24	6,05	1,21	<0,3	19,64	0,40	77,86
	*	1,52	1,45	18,90	7,18	11,71	4,39	1,57	5,82	<0,3	1,12	19,39	1,30	74,35
	*	10,12	0,94	12,65	6,42	13,35	8,35	2,07	7,42	<0,3	<0,3	22,20	1,20	84,72
	*	1,16	0,68	21,05	6,04	12,83	7,62	2,02	7,83	<0,3	<0,3	20,14	1,35	80,72
	*	2,01	1,04	25,31	5,21	9,36	7,37	1,59	6,67	<0,3	0,67	18,35	1,40	78,98
Аутигенный фосфат LREE (фаза рабдофанового типа)														
	Точка	SiO_2	Al_2O_3	FeO	CaO	Ce_2O_3	La_2O_3	Pr_2O_3	Nd_2O_3	Sm_2O_3	P_2O_5	SO_3	Сумма	
	2	6,42	2,51	9,18	4,58	18,72	9,08	2,36	7,55	<0,3	18,95	<0,3	88,40	
	*	1,18	0,43	3,76	0,41	30,13	14,55	2,94	10,65	<0,3	29,15	<0,3	93,20	
	*	<0,3	<0,3	<0,3	1,04	29,54	14,62	<0,3	10,53	<0,3	29,15	<0,3	84,88	
	*	<0,3	<0,3	<0,3	0,53	34,56	16,97	3,48	9,94	<0,3	30,20	<0,3	95,68	
	*	<0,3	<0,3	15,44	7,29	10,13	5,44	<0,3	6,80	<0,3	22,48	<0,3	67,78	
	*	<0,3	<0,3	19,41	8,71	14,18	8,70	1,81	8,22	<0,3	26,23	<0,3	87,26	
	*	<0,3	<0,3	18,47	8,66	15,65	7,90	1,83	7,79	1,32	27,42	<0,3	89,04	

CaO) и, иногда, Y (0,6–1,1 мас. % Y_2O_3). Обобщенная формула (Ce 0,23–0,42 Ca 0,22–0,47 La 0,09–0,20 Nd 0,10–0,15 Pr 0,03–0,05 Y 0,00–0,050 Sm 0,00–0,03)(P 0,82–0,98 S 0,02–0,18)O_4) • nH_2O позволяет отнести это соединение к твердым растворам ряда рабдофан – тристрамит (Ca, U, Fe^{3+}) ((PO_4), (SO_4)) • $2H_2O$).

Обсуждение

Осадочные железные руды из различных месторождений мира характеризуются однотипными спектрами распределения REE и отчетливым обогащением MREE (рис. 2). Среди них самыми богатыми по содержанию ΣREE являются руды Бакчара и Керчи.

Согласно [14], REE бюджет КЖР, главным образом, сформирован на стадии раннего диагенеза осадка при минимальном вкладе терригенного источника. Конфигурация $(REE+Y)_{SN}$ спектров валовых проб этих руд с опережающим накоплением MREE указывает на то, что ведущим механизмом аккумуляции в них REE является их сорбция на поверхности гидроксидов Fe^{3+} [14, 17]. По среднему содержанию ΣREE и степени обогащения MREE и Y керченские руды сходны с богатыми эксплуатируемыми рудами каолиновых кор выветривания (южный Китай) ($X_{ср}$ = 1023, n = 32; X_{max} = 3900 ppm) [3]. В сравнении с традиционными магматогенными месторождениями они обладают малыми запасами ΣREE (< 0,01–0,02 Мт), тем не менее сегодня на их долю приходится около 35 % общего объема производства REE в Китае. Этот тип REE руд отличают высокие концентрации промышленно-востребованных Pr и Nd (таблица 2) и предельно низкие уровни накопления Th и U, вследствие чего их добыча высоко рентабельна [3, 16].

Резкое обогащение тонких фракций керченских Fe^{3+}-(окси)гидроксидных руд ΣREE (699–3011 ppm; n = 24), La, Pr, Nd, Sm обусловлено обилием аутигенных фосфатов LREE. Среди них преобладают гидратированные фазы рабдофанового типа, состав которых отклоняется от теоретического ($Ce(PO_4)$ • nH_2O) в сторону обогащения La, Pr, Nd. Сопоставление соотношений LREE : MREE : HREE : U : Th в этих фазах с промышленными минералами из магматогенных REE руд показало, что аутигенные LREE-фосфаты из КЖР существенно богаче MREE (в том числе Gd), Y, Pr, Nd и беднее Th и U (таблица 2, рис. 3).

Поскольку основные запасы REE монацитовых месторождений приходится на Ce и La, при извлечении индустриально востребованных Pr, Nd, Gd из таких руд, большая часть добытой рудной массы и основная доля запасов ΣREE идет в отвалы. Более

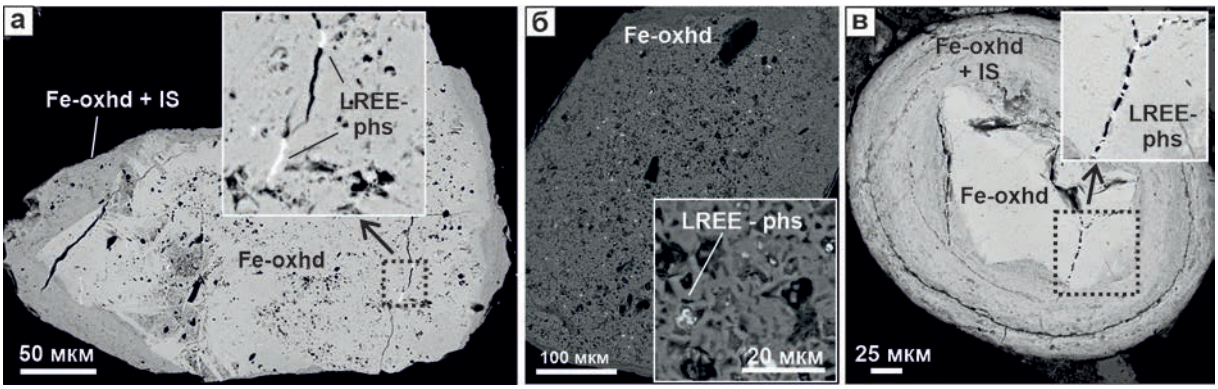


Рис. 1. Распределение аутигенных LREE-фосфатов в псевдоолитах и оолитах из руд Камыш-Бурунской мульды. LREE-фосфаты в слепых трещинах (а) и порах (б) во внутренней части псевдоолитов. Выполнение LREE-фосфатами слепых трещин, рассекающих угловатое Fe^{3+}-(окси)гидроксидное ядро и утыкающихся в тонкие концентры оолита (в)

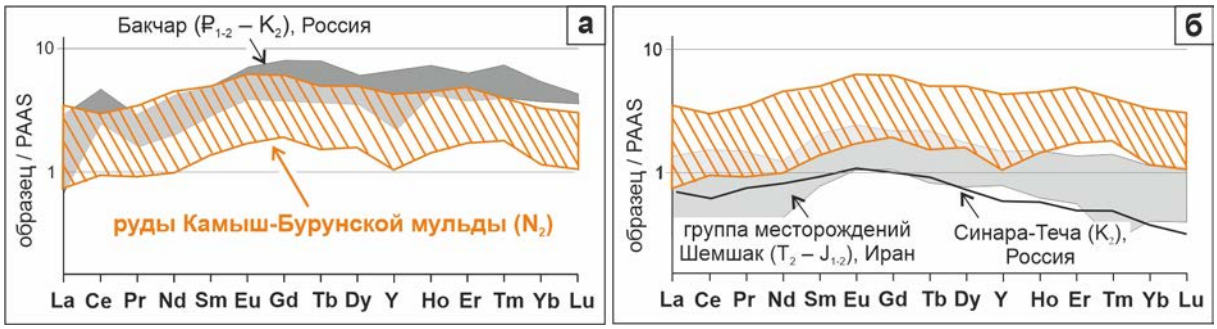


Рис. 2. PAAS-нормализованные спектры распределения $(REE+Y)_{SN}$ валовых проб Fe^{3+}-(окси)гидроксидных руд Камыш-Бурунской мульды в сравнении с аналогами из фанерозойских месторождений морских осадочных железных руд: мелководных [11] (а) и прибрежно-морских [1, 13] (б)

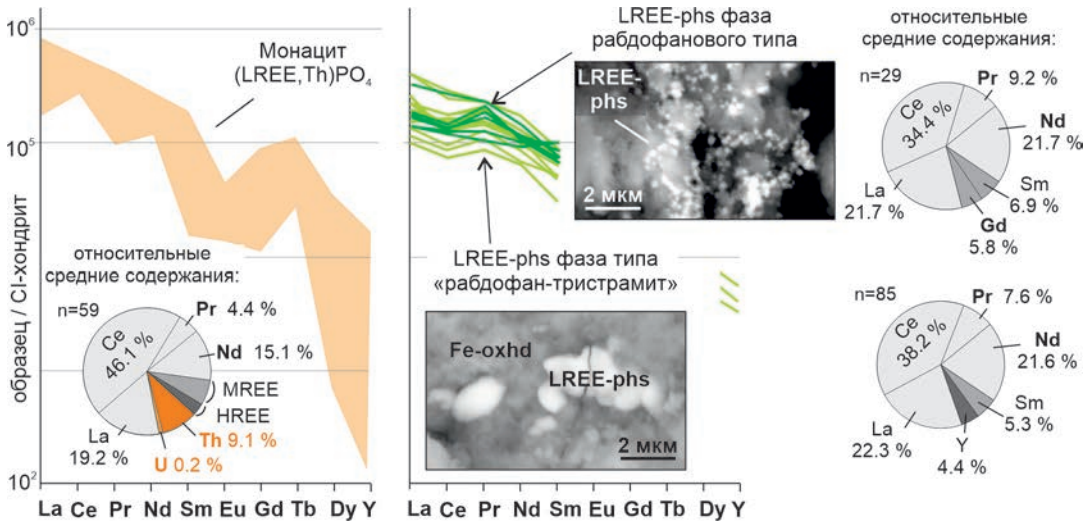


Рис. 3. Хондрит(C1)-нормализованные $(REE+Y)_N$ спектры аутигенных фаз рабдофанового типа из Fe^{3+}-(окси)гидроксидных руд Камыш-Бурунской мульды в сравнении со спектрами монацитов из традиционных магматогенных месторождений [7–9, 11]

Таблица 2. Средние доли (в отн. %) LREE, MREE, HREE, Y, Th и U в REE рудах и главных рудных минералах из месторождений различных генетических типов

Осадочные			Гипергенные	Магматогенные		
Керченские железные руды			Коры выветривания [3]	Карбонатиты, щелочные сиениты и граниты [6–9, 11]		
	Преимущественно гидроксиды Fe^{3+} n = 17	Рабдофано-подобные фазы n = 114	Каолин n = 32	Монацит $(LREE,Th)PO_4$ n = 59	Бастнезит $(Ce,La)CO_3(OH,F)$ n = 27	Лопарит $(Ce,Na,Ca)2(Ti,Nb)_2O_6$ n = 14
LREE	68,6	84,8	70,9	87,3	92,2	95,7
MREE	11,9	11,0	11,5	5,2	4,8	0,3
HREE	3,6	0,0	2,3	0,0	0,1	0,0
Y	12,4	4,2	14,4	1,6	1,0	0,0
Th	3,2	0,0	0,8	7,2	1,2	3,5
U	0,4	0,0	0,0	0,2	0,0	0,4

того, в технологической цепочке прогрессивно накапливаются Th и U. В итоге затраты на обеспечение радиационной безопасности существенно удорожают стоимость финального продукта, а отвалы обладают высоким уровнем активности.

Заключение

Традиционные REE месторождения обладают большими запасами ΣREE с преобладанием Ce и La и высокими уровнями накопления U и Th. Современная стратегия развития сырьевой базы REE ориентирована на иные объекты, где общие запасы ΣREE могут быть невелики, однако доля промышленно значимых элементов (Nd, Pr, Gd, Eu, Er, Dy, Tb) и их запасы – значительны. Благоприятным фактором также является низкий уровень содержаний U и Th [3, 6–8, 10]. Особенности накопления REE в керченских рудах характеризует их как коммерчески привлекательный тип нетрадиционного REE сырья. Накопление в керченских рудах промышленно востребованных Pr, Nd и MREE минимизирует затраты на селективное извлечение этих элементов, а низкие концентрации Th и U резко снижают класс радиологической опасности. Преимуществами месторождений КЖР как нетрадиционного ресурса REE также являются их простое геологическое строение, возможность отработки открытым способом и дисперсное состояние руд. Есть веские основания полагать, что аномальными уровнями накопления MREE + LREE также обладают и отходы обогащения этих руд, которые на протяжении XX века складировались в хвостохранилищах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-17-01056П).

Литература

1. Новоселов К. А. Минералогические и геохимические особенности оолитовых железняков Синаро-Теченского месторождения (Курганская обл., Россия) / Новоселов К. А., Белогуб Е. В., Котляров В. А., Филиппова К. А., Садыков С. А. // Геология рудных месторождений, 2018. – № 60 (3). – С. 301–314.
2. Шнюков Е. Ф. Генезис киммерийских железных руд Азово-Черноморской рудной провинции. / Киев: Наукова думка, 1965. – 194 с.
3. Bao Z. Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China / Bao Z., Zhao Z. // Ore Geology Reviews, 2008. – № 33 (3–4). – P. 519–535.
4. Chakhmouradian A. R. Rare earth elements: minerals, mines, magnets (and more) / Chakhmouradian A. R., Wall F // Elements, 2012. – № 8 (5). – P. 333–340.
5. Emsbo P. Rare earth elements in sedimentary phosphate deposits: Solution to the global REE crisis? / Emsbo P., McLaughlin P. I., Breit G. N., du Bray E. A., Koenig A. E. // Gondwana Research, 2015 – № 27. – P. 776–785.
6. Kogarko L. N. Chemical evolution and petrogenetic implications of loparite in the layered, agpaitic Lovozero complex, Kola Peninsula, Russia. / Kogarko L. N., Williams C. T., Woolley A. R. // Mineralogy and Petrology, 2002. – № 74 (1). – P. 1–24.
7. Lapin A. V. Distribution of REE, Y, Sc, and Th in the unique complex rare-metal ores of the Tomtor deposit / Lapin A. V., Tolstov A. V., Kulikova I. M. // Geochemistry International, 2016. – № 54 (12). – P. 1061–1078.
8. Le Bas M. J. Carbonatite dykes at bayan Obo, inner Mongolia, China / Le Bas M. J., Kellere J., Kejie T., Wall F., William C. T., Peishan Z. // Mineralogy and Petrology, 1992. – № 46 (3). – P. 195–228.
9. Lottermoser B. G. Rare-earth element mineralisation within the Mt. Weld carbonatite laterite, Western Australia // Lithos, 1990. – № 24 (2). – P. 151–167.
10. McDonough W. F. The composition of the Earth. / McDonough W. F., Sun S. // Chemical Geology, 1995. – № 120. – P. 223–253.
11. Oliveira E. K. Processos geológicos registados em monazites de pláceres marinhos de Buena (Rio de Janeiro-Brasil). / Oliveira E. K., Chaves A. O // Comunicações Geológicas, 2016. – № 103 (1). – P. 45–49.
12. Rahiminejad A. H. Synsedimentary formation of ooidal ironstone: an example from the Jurassic deposits of SE central Iran / Rahiminejad A. H., Zand-Moghadam H. // Ore Geology Reviews, 2018. – № 95. – P. 238–257.
13. Rudmin M. Ooidal ironstones in the Meso-Cenozoic sequences in western Siberia: assessment of formation processes and relationship with regional and global earth processes / Rudmin M., Banerjee S., Abdullayev E., Ruban A., Filimonenko E., Lyapina E., Kashapov R., Mazurov A. // Journal of Palaeogeography, 2020. – № 9. – P. 1–21.
14. Sokol E. V. Geochemistry and mineralogy of rare earth elements in high-phosphorus ooidal ironstones: a case study of the Kamysh-Burun deposit (Azov-Black Sea iron Province) / Sokol E. V., Kokh S. N., Kozmenko O. A., Nekipelova A. V., Rudmin M., Khvorov P. V., Artemyev D. A. // Ore Geology Reviews, 2020. – 103827.
15. Taylor S. R. The continental crust: its evolution and composition. / Taylor S .R., McLennan S. M //, London: Blackwell, 1985. – 312 p.
16. Yang X. J. China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation / Yang X. J., Lin A., Li X. L., Wu Y., Zhou W., Chen Z. // Environmental Development, 2013. – № 8. – P. 131–136.
17. Yang J. Controls on rare earth element distributions in ancient organic-rich sedimentary sequences: role of post-depositional diagenesis of phosphorus phases / Yang J., Torres M., McManus J., Algeo T. J., Hakala J. A., Verba C. // Chemical Geology, 2017. – V. 466 – P. 533–544.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫЯВЛЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА В МЕЗО-КАЙНОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ АМУРО-ЗЕЙСКОЙ ДЕПРЕССИИ

А. А. Новгородцев[1], Ю. Б. Миронов[2]

[1]АО «РУСБУРМАШ»
Москва, Россия, AANovgorodtsev@rbm-armz.ru
[2]ФГБУ «ВСЕГЕИ»
Санкт-Птербург, Россия, ogumr@vsegei.ru

PROSPECTS FOR DETECTING URANIUM DEPOSITS IN THE MESO-CENOZOIC SEDIMENTS OF THE AMURO-ZEYSKAYA DEPRESSION

A. A. Novgorodtsev[1], Y. B. Mironov[2]

[1]RUSBURMASH Corp
Moskow, Russia, AANovgorodtsev@rbm-armz.ru
[2]FSBI "VSEGEI"
St.- Petersburg, Russia, ogumr@vsegei.ru

The Amur-Zeya depression is a large epiriftogenic depression structure with signs of the formation of hydrogenous uranium mineralization.

Paleoclimatic, paleotectonic, isotopic-geochronological data, along with direct signs of uranium mineralization, indicate that during the formation of the sedimentary cover of the Amur-Zeya depression, two epochs of exogenous migration and accumulation of uranium were manifested - Upper Cretaceous, with an age of predicted uranium accumulations of 60 90 million years, and Neogene 9–20 million years. Commercial exogenous uranium deposit of the Amur-Zeya depression is predicted in connection with the manifestation of both the Upper Cretaceous and Neogene epochs of migration and accumulation of uranium. The leading role, according to a set of predictive criteria, belongs to the Upper Cretaceous, characterized by the activation of the tectonic regime and climate aridization.

Введение

Настоящее сообщение направлено на обоснование постановки прогнозно-оценочных и поисковых работ на экзогенный тип уранового оруденения в бортах Амуро-Зейской депрессии, сложенной мезо-кайнозойскими терригенными отложениями (лист M-52), где в качестве первоочередной площади рассматривается западное обрамление Буреинского массива. В обоснование положены литературные и фондовые материалы, а так же результаты изучения первичных геологических материалов поисковых работ на уголь в мезо-кайнозойских отложениях Амуро-Зейской депрессии, выполненных бурением по сети 30 × 5 км и отдельными скважинами в семидесятые годы XX века.

Материалы и методы

В строении Амуро-Зейской впадины, как и Сунляо-Амурского эпирифтогенного седиментационного бассейна, выделяется допозднеюрский складчатый фундамент, позднеюрско-раннемеловой, рифтогенно-активизационный структурный ярус и позднемеловой – кайнозойский рыхлый платформенный чехол.

Особенностью фундамента является его интенсивная гранитизация под влиянием неоднократно проявленных процессов тектоно-магматической активизации позднепротерозойского, ранне-среднепалеозойского и позднепалеозойско-раннетриасового времени. Состав гранитоидов меняется от гранодиоритов до субщелочных и лейкократовых гранитов, а средние количества урана в них находятся в пределах 2,75–3,67 г/т, при содержании подвижного урана 0,5–0,7 г/т [1].

Повышенными содержаниями урана обладают терригенные угленосные отложения раннемелового возраста (в среднем 3,21 г/т). В базальном горизонте раннемеловых угленосных отложений, развитых в обрамлении Амуро-Зейской впадины, содержание урана достигает 6,5 г/т.

Плитный комплекс Амуро-Зейской впадины является составной частью осадочного чехла Сунляо-Амурского седиментационного бассейна, в центральной и южной частях которого (во впадине Сунляо), преимущественно в аридной климатической обстановке, на протяжении большей части мелового времени существовал крупный внутриконтинентальный озерный бассейн, осадконакопление в котором сопровождалось формированием нефтематеринских глинистых сланцев, обогащенных органическим материалом.

Региональный сток в этот бассейн осуществлялся как с запада, так и со стороны северной гумидной зоны, через периодически подтапливаемую Амуро-Зейскую впадину и перемычку Сунву по крупной магистральной речной долине, унаследованной развивавшейся вдоль одного из поднеюрско-раннеме-

ловых грабен-прогибов. Водосборный бассейн этой реки, которая условно названа пра-Селемджой, находился в обрамлении Амуро-Зейской впадины и к северу от нее. Подтверждением сказанного служит присутствие в северной части озерного бассейна Сунляо дельтовых фаций значительной мощности, отмечающих существование здесь устья крупной реки [1].

Осадочный чехол Амуро–Зейской впадины, мощность которого составляет во внутренней ее части 400–800 м, а на периферии 50–100 м, формировался на протяжении последних 90 млн. лет (с туронского века) в условиях дифференцированного прогибания, с непрерывной педипленизацией окраин примыкающих поднятий, при наличии густоразветвленной разнопорядкой гидросети, заложенной еще в рифтогенный этап развития региона и функционирующей унаследовано вплоть до плейстоцена [3]. В разрезе осадочного чехла, как и в его основании, отмечены перерывы в осадконакоплении, которые фиксируются в предмаастрихтское время, в олигоцене и миоцене и сопровождаются формированием неоэлювия и размывом нижележащих отложений.

В пострифтогенном периоде развития Амуро–Зейской впадины выделено два этапа: K_2-N_2 и N_2-Q. Первый из них ознаменовался формированием осадочного чехла впадины, второй - проявлением базального вулканизма, разрывом связей со впадиной Сунляо, общей инверсией депрессионной структуры и размывом аккумулированных ранее осадочных отложений по краям впадины и долинам плейстоценовой гидросети, врезавшейся в осадочный чехол до глубины 60–100 м.

Отложения платформенного этапа развития разделены по вещественному составу, условиям образования и геохимическим особенностям на четыре осадочных формации (снизу вверх): глинисто-песчаную пестроцветную завитинскую свиту (K_{1-2}al-sm), глинисто-песчаную пестроцветную – цигаянская свита (K_2t-km), глинисто-гравийно-песчаную сероцветную кивдинская свита (K_2m), песчано-глинистую буроугольную бузулинская свита ($₽$-N_1^2) и галечно-гравийно-песчаную пестроцветную сазанковская свита (N_1^3-N_2). С этапом неотектонической активизации связано образование двух формаций: субщелочной базальтовой (βN_2-Q_1) и песчано-галечной буроцветной (Q_{II}-Q_{IV}).

Палеоклиматические [4], палеотектонические [2, 3] и изотопно-геохронологические данные, наряду с прямыми признаками уранового оруденения, свидетельствуют о том, что в период формирования осадочного чехла Амуро-Зейской впадины были проявлены две эпохи экзогенной миграции и накопления урана – верхнемеловая, с цифрами абсолютного возраста прогнозируемых аккумуляций урана в 60–90 млн. лет, и неогеновая (9–20 млн. лет). Отмечается в регионе и проявление современного накопления урана в донных отложениях водотоков, дренирующих массивы радиогеохимически специализированных пород.

Гидрогенное урановое оруденения Амуро-Зейской потенциально урановосной металлогенической области прогнозируется в связи с проявлением как верхнемеловой, так и неогеновой эпох миграции и накопления урана. При этом текущая роль по комплексу прогнозных критериев принадлежит верхнемеловой эпохе, характеризующейся не только активизацией тектонического режима, но и аридизацией климата.

Наличие в верхнемеловой части разреза зоны грунтового окисления среднесантонского времени, контролирующей аккумуляции урана, допускает возможность формирования в Амуро-Зейской впадине и верхнемеловых зон пластового окисления.

Ведущим типом прогнозируемого уранового оруденения являются экзогенное оруденение в связи с выклиниванием зоны пластового окислениия в аллювиальных отложениях верхнего мела и отчасти палеогена, а также оруденение в палеодолинах, врезанных в радиогеохимически специализированный субстрат.

Однако, принимая во внимание наибольшую перспективность в отношении уранового оруденения, развитие зон пластового окисления в турон-кампанской генерации и предполагая, что они формируются от краевых частей верхнемелового седиментационного бассейна, именно эти площади рекомендуются для первоочередного изучения.

Ориентируясь на этот критерий, в составе Амуро-Зейской потенциально урановосной области выделены две потенциально урановосные металлогенические зоны, совпадающие с краевыми частями

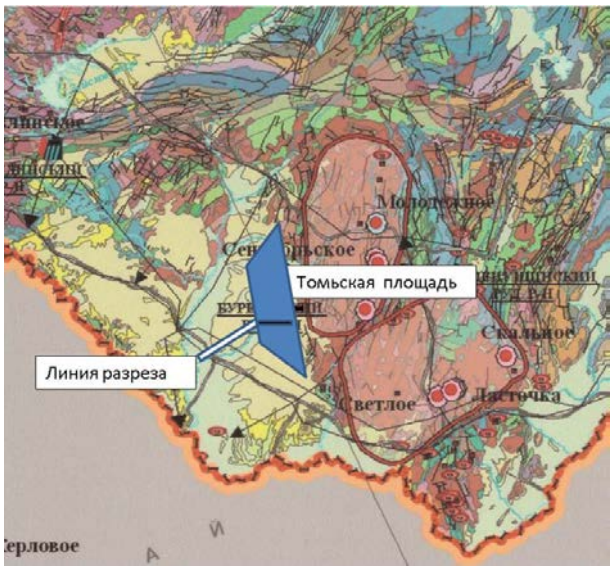


Рис. 1. Амуро-зейская депрессия. Положение выделенной первоочередной поисковой площади

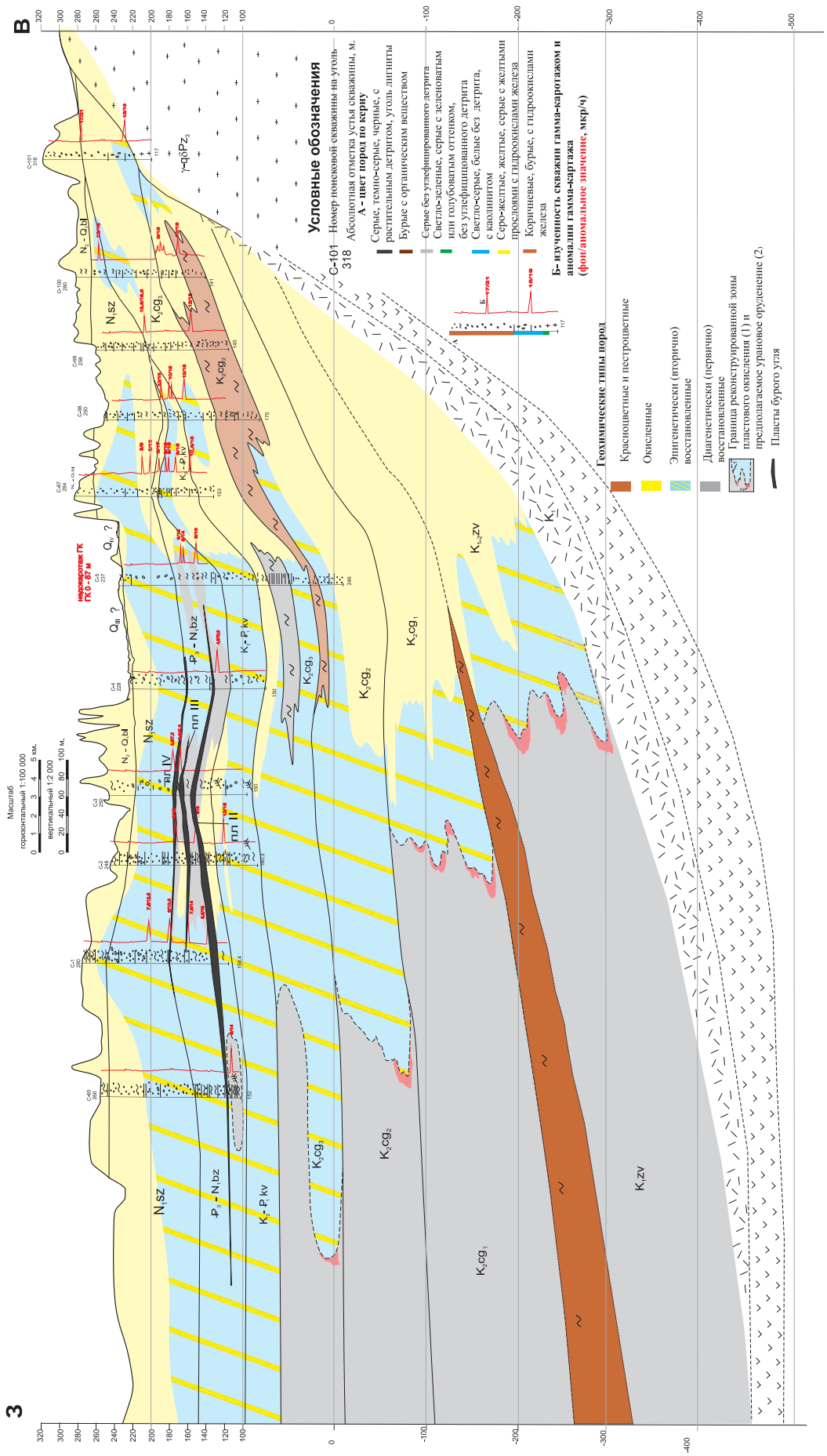


Рис. 2. Томская площадь. Широтный геологический разрез

верхнемелового седиментационного бассейна, обладающие прямыми признаками накопления урана: Благовещенская и Мамын-Туранская.

Благовещенская потенциально урановоносная металлогеническая зона охватывает западный борт верхнемелового седиментационного бассейна примыкающую к нему часть обрамления, где предполагаются сохранение верхнемеловых палеодолин. Она вытянута в субмеридиональном направлении, от границы с Китаем на 220 км при ширине около 50 км. Восточная граница зоны проведена по предполагаемому руслу верхнемеловой реки пра-Селемджи, перехватывавшему подземный сток и ограничивавшему развитие инфильтрационных процессов.

В пределах зоны обнаружены признаки накопления урана в верхнемеловой части разреза осадочного чехла, контролируемые зоной грунтового окисления. Подстилающие осадочных чехол породы на большей части зоны представлены образованиями Селемджинской складчатой системы и раннемелового рифтогенного комплекса. Лишь к югу от 500 с. ш. фундамент осадочного чехла представлен магматическими и метаморфическими формациями, относящимися к Туранскому кристаллическому блоку. В контурах зоны прогнозируется выявление уранового оруденения в верхнемеловых базальных палеодолинах.

Мамын-Туранская потенциально урановоносная металлогеническая зона включает восточную краевую часть Амуро-Зейской впадины. Фундамент зоны принадлежит Туранскому кристаллическому блоку с широким распространением гранитоидных пород. Осадочный чехол, мощностью до 700 м, состоит из трансгрессивно перекрывающих друг друга верхнемеловых и кайнозойских формаций. Зона вытянута вдоль восточного обрамления впадины на 250 км при ширине от 40 до 50 км. Прогнозируется экзогенное урановое оруденение в верхне-меловых аллювиальных отложениях в связи с зоной пластового окисления.

Исходя из проявленности прогнозно-геологических критериев локализации экзогенного уранового оруденения, в качестве первоочередной, рекомендуется Томьская площадь Рис. 1), центральное звено Мамын-Туранской потенциально урановоносной зоны на отрезке от г. Райчихинск до р. Томь.

Площадь наиболее подготовлена для постановки поисковых на уран работ. В пределах Томьской площади выполнены поисковые работы на бурый уголь (Малыгин В. И., 1970 г. ф.). В ходе этих работ на площади пробурено 105 скважин по пяти субширотным профилям и связывающего их одного субмеридионального.

Расстояния между широтными профилями скважин 30 км, шаг по профилю в среднем 5–6 км. Глубины скважин в среднем около 150–160 метров, они в основном вскрывают четвертичные, неогеновые, неоген-палеогеновые отложения белогорской, сазанковской и бузулинской свит.

Отдельные скважины пробурены до глубин 240–260 м. и вскрывают верхи отложений верхнего мела (кивдинской, цагаянской свит) в которых установлено достаточно широкое развитие зон окисления (Рис. 2).

Большая часть скважин охвачена каротажными исследованиями (ГК литологический, ГГК-П, КС, ПС).

Заключение

Прогнозируемые геолого-промышленные типы представлены: – в Притяньшанской урановорудной мегапровинции (СНГ) в связи с региональной зоной пластового окисления; – на территории РФ – палеодолинный представлен промышленными месторождениями урана в Зауральской урановоносной области (м-ния Далматовское, Хохловское, Добровольное).

Кроме того, промышленная значимость возможного уранового оруденения связывается в целом с расширением МСБ урана Дальнего Востока, освоенностью района и экономически выгодной схемой добычи.

Оценка прогнозных ресурсов Томьской площади по категории Р3 в количестве 90 тыс. т. урана, выполнена ФГУП «ВСЕГЕИ» (Протокол № 5/14 заседания секции прогнозно-минерагенических работ на твердые полезные ископаемые при Ученом Совете ФГУП «ВСЕГЕИ» от 12.03.2014 г). Оцененные ресурсы могут являться только частью потенциала урановоносности Амуро-Зейской депрессии в связи с зоной пластового окисления, что даёт предпосылки для выявления крупной урановоносной провинции.

Литература

1. Кириллова Г. Л. Сравнительная характеристика внутриконтинентальных рифтовых бассейнов восточной Азии: Сунляо и Амуро-Зейский. // Тихоокеанская геология, 1994. – № 6. – С. 33–54.
2. Коковкин А. А. Некоторые особенности мезозойско-кайнозойских рифтогенов восточного сегмента Центрально-Азиатского пояса в связи с процессами гидрогенного рудогенеза. // Строение и эволюция Востока Азии. Косыгинские чтения. Хабаровск, ИТиГ, 1999. – С. 167–174.
3. Пан В. П., Сорокин А. П. Геотектонический режим формирования меловых-неогеновых отложений чехла Амуро-Зейской депрессии. / Осадочные формации нефтегазоносных областей Дальнего Востока. – Владивосток, 1975. – С 129–137.

4. Ронов А. Б., Балуховский А. Н. Климатическая зональность материков и тенденции изменений климата в позднем мезозое и кайнозое. // Литология и полезные ископаемые, 1981. – № 5 – С. 118–136.

ПРИРОДА РАДИОАКТИВНОСТИ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Д. А. Новиков[1,2], Т. В. Корнеева[1], А. А. Хващевская[3], М. С. Мельгунов[4], Н. Г. Сидорина[5], А. А. Коханенко[5], А. В. Черных[1], А. А. Максимова[1], Ф. Ф. Дульцев[1], А. С. Деркачев[1]

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН
Новосибирск, Россия, NovikovDA@ipgg.sbras.ru
[2]Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия
[3]Томский политехнический университет
Томск, Россия, unpc_voda@mail.ru
[4]Институт геологии и минералогии СО РАН
Новосибирск, Россия, mike@igm.nsc.ru
[5]Сибирский федеральный научно-клинический центр Федерального медико-биологического агентства
Северск, Россия, sidorinang@med.tomsk.ru

NATURE OF RADIOACTIVITY OF THE MINERAL WATERS OF THE CRIMEAN PENINSULA

D. A. Novikov[1,2], T. V. Korneeva[1], A. A. Khvaschevskaya[3], M. S. Melgunov[4], N. G. Sidorina[5], A. A. Kokhanenko[5], A. V. Chernykh[1], A. A. Maksimova[1], F. F. Dultsev[1], A. S. Derkachev[1]

[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS
Novosibirsk, Russia, NovikovDA@ipgg.sbras.ru
[2]Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russia
[3]National Research Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, unpc_voda@mail.ru
[4]Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
Novosibirsk, Russia, mike@igm.nsc.ru
[5]Siberian Federal Research and Clinical Center of the Federal Medical and Biological Agency
Seversk, sidorinang@med.tomsk.ru

The first data on the radionuclide composition (^{238}U, ^{232}Th и ^{222}Rn) of mineral waters from 23 deposits and occurrences at the Crimean Peninsula are presented. Prevailing waters are characterized by SO_4–Cl–HCO_3 Na, Cl Na, SO_4–HCO_3 Mg–Ca–Na, SO_4–Cl Mg–Na composition, with TDS from ultrafresh to brine (0.4–202.9 g/dm^3) and a broad variety of the geochemical parameters from sharply reductive to oxidative. The concentrations of natural radionuclides in the waters are (mg/dm^3): ^{238}U ($6.3 \cdot 10^{-7} – 5.9 \cdot 10^{-2}$), ^{232}Th ($7.1 \cdot 10^{-7} – 4.7 \cdot 10^{-4}$). The activity of water-dissolved radon (^{222}Rn) varies from 0.1 to 13.2 Bq/l. The $^{232}Th/^{238}U$ ratio is within the range $1.37 \cdot 10^{-3} – 5.94$. The uranium isotope ratio (γ) $^{234}U/^{238}U$ in the waters varies from 1.4 to 7.1, with the activity of uranium isotopes (mBq/l): ^{234}U (0.3–46), ^{238}U (0.2–11).

Введение

Минеральные воды в Крыму весьма разнообразны и известны с античных времен. Первые упоминания источников минеральных вод в научной литературе встречаются в работах Н. И. Андрусова, а их детальные исследования были начаты позднее в начале XX века и отражены в работах В. А. Обручева, С. П. Попова, А. С. Моисеева, М. М. Фомичева и Л. А. Яроцкого. Наиболее крупное обобщение по минеральным водам Крыма выполнено в многотомнике Гидрогеология СССР [8]. В 1980 г. под редакцией А. Е. Бабинец вышла в свет сводная работа по минеральным водам Украинской ССР [17].

Несмотря на длительный период изучения минеральных вод Крымского полуострова следует отметить, что до сих пор в научной литературе остаются не рассмотренными механизмы формирования их состава. Практически не изучен их изотопный состав, распределение радиоактивных и редкоземельных элементов. В последние годы вопросы по гидрогеохимии минеральных вод Крыма поднимались в ра-

ботах Г. Н. Амеличева и др. [4], К. Д. Бабовой и др. [5], А. С. Кайсинова и др. [10], Д. А. Новикова и др. [1–2, 13–16].

Крым обладает большим рекреационным потенциалом, важнейшими составляющими которого являются минеральные воды и грязи. Отсюда возникает необходимость иметь актуальные сведения об их изотопно-геохимических особенностях, включая распределение радионуклидов.

Материалы и методы

В настоящей работе представлены актуальные данные по 23 месторождениям и проявлениям минеральных вод Крыма (рис. 1). Гидрогеохимическое опробование этих объектов (25 проб) проводилось во время полевых работ 2019–2020 гг. Непосредственно на объектах было выполнено определение pH, Eh, температуры, содержания растворенного O_2, HCO_3^- с помощью оборудования (Hanna HI9125, кислородомер АКПМ-1-02Л) и полевой гидрогеохимической лаборатории. Измерение содержаний ^{222}Rn в водах проводилось на комплексе «Альфарад плюс» в день отбора пробы. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Данные по общей β-активности вод, а также активностях ^{234}U, ^{238}U получены после предварительной радиохимической пробоподготовки в ИГМ СО РАН. Выделение групп и типов минеральных вод выполнялось в Испытательной лаборатории природных лечебных ресурсов ФГБУ СибФНКЦ ФМБА России согласно ГОСТ 54316-2020 [9].

Результаты и их обсуждение

Изученные воды значительно отличаются по химическому составу, геохимическим параметрам среды и содержаниям специфических компонентов (H_2SiO_3, H_3BO_3, I, Br, Se). Доминируют воды SO_4–Cl–HCO_3 Na, Cl Na, SO_4–HCO_3 Mg–Ca–Na, SO_4–Cl Mg–Na состава с широкой вариацией по величине общей минерализации от 0,4 до 202,9 г/дм^3. По геохимической обстановке воды можно разделить на две разновидности: с восстановительными (Eh от –330,2 до –22,3 мВ, pH от 7,3 до 9,1 и содержанием $O_{2раств.}$ 0,79–6,48 мг/дм^3) и окислительными (Eh +22,1 – +158,5 мВ; pH 7,0–8,4; $O_{2раств.}$ от 2,73–6,92 мг/дм^3) условиями. Следует отметить, что ряд водопроявлений требует до-

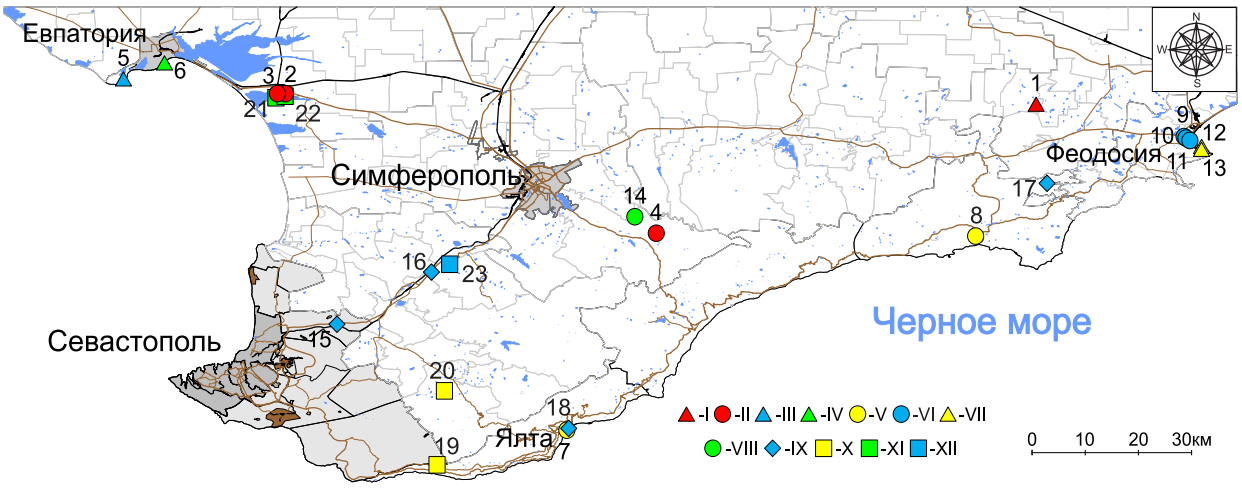


Рис. 1. Местоположение изученных месторождений и проявлений минеральных вод на территории Крымского полуострова

Типы минеральных вод: I –Ходыженский (1 – Айвазовское месторождение, глубина скважины 200 м); II –Карачинский (2 – Сакское месторождение, Санаторий им. Пирогова Министерство обороны РФ, глубина скважины 1001 м; 3 – Сакское месторождение, термальные воды, глубина скважины 960 м; 4 – скважина «У Геологов», Красные пещеры); III – Омский (5 – Евпаторийское месторождение, пансионат Чайка, скважина 10 (6243), термальная вода, интервал 980–1050 м, г. Евпатория); IV –Калининградский (6 – бювет Карникитская вода, г. Евпатория); V –Владикавказский (7 – бювет № 1 в Приморском парке, г. Ялта; 8 – Судакское месторождение, скважина № 6709 (старый номер 76), глубина 270 м); VI – Анапский (9 – Феодосийское месторождение, скважина № 6614, глубина 200 м; 10 – Феодосийское месторождение, скв. № 6616, глубина 206 м; 11 – бювет, вода Феодосийская, г. Феодосия); VII – Сибирский (12 – Карантин 3, г. Феодосия; 13 – Карантин 2, г. Феодосия); VIII – Ачалукский тип (14 – скважина у с. Дружное); IX – минеральные питьевые столовые воды (15 – скважина у часовни Николая Чудотворца, с. Верхнесадовое; 16 – скважина рядом с с. Глубокий Яр; 17 – термальный источник выше с. Щебетовка; 18 – бювет на ул. Чехова, г. Ялта; 19 – минеральный источник «Жабья радость»); X – маломинерализованные хлоридные кальциево-натриевые йодные (20 – минеральные воды Аджи-Су, каптаж в один колодец); XI – крепко рассольные хлоридные натриевые борные бромные (21 – Сакское озеро, Восточный бассейн, г. Саки; 22 – рапа для бальнеолечения, Санаторий им. Пирогова Министерство обороны РФ, г. Саки); XII – пресные гидрокарбонатно-сульфатные натриевые (23 – Севастьяновская сероводородная скважина).

Таблица 1. Радионуклидный состав минеральных вод Крымского полуострова

Тип	№ на рис. 1	Дата отбора	Eh, мВ	pH, д.е.	M, мг/дм³	Элементы, мг/дм³		Активность, мБк/дм³			^{222}Rn, Бк/дм³	$\frac{^{232}Th}{^{238}U}$	$\frac{^{234}U}{^{238}U}$
						^{238}U	^{232}Th	Общее «β»	^{238}U	^{234}U			
I	1	10.09.2020	–330,2	8,20	1706	$1{,}50 \cdot 10^{-4}$	$1{,}50 \cdot 10^{-5}$	10 ± 4	0,18 ± 0,04	0,3 ± 0,05	1 ± 0	0,10	1,67
II	2	18.09.2020	–132,1	8,05	1895	$4{,}27 \cdot 10^{-6}$	$2{,}63 \cdot 10^{-5}$	46 ± 6	0,7 ± 0,16	1,7 ± 0,3	5 ± 1	6,15	2,43
II	3	18.09.2020	–201,1	8,28	2189	$4{,}13 \cdot 10^{-6}$	$2{,}37 \cdot 10^{-5}$	52 ± 5	0,81 ± 0,21	2,3 ± 0,4	2 ± 0	5,74	2,84
II	4	06.09.2020	–178,3	9,01	1271	$4{,}14 \cdot 10^{-4}$	$1{,}57 \cdot 10^{-5}$	22 ± 3	6,5 ± 0,6	46 ± 2	4 ± 1	$3{,}79 \cdot 10^{-2}$	7,08
III	5	17.09.2020	–143,3	7,79	9039	$3{,}90 \cdot 10^{-6}$	$2{,}36 \cdot 10^{-5}$	128 ± 6	0,9 ± 0,23	2,2 ± 0,4	2 ± 0	6,05	2,44
IV	6	17.09.2020	146,2	8,45	3621	$6{,}14 \cdot 10^{-6}$	$1{,}18 \cdot 10^{-6}$	–	–	–	0,1	0,19	–
V	7	04.09.2020	–179,1	7,26	1098	$2{,}03 \cdot 10^{-5}$	$9{,}98 \cdot 10^{-6}$	35 ± 5	0,36 ± 0,07	1,3 ± 0,1	0,1	0,49	3,61
V	8	07.09.2020	–302,5	7,38	1211	$2{,}19 \cdot 10^{-4}$	$4{,}69 \cdot 10^{-4}$	43 ± 5	3,1 ± 0,4	6 ± 0,6	1 ± 0	2,14	1,94
VI	9	10.09.2020	–177,5	7,49	3261	$1{,}69 \cdot 10^{-5}$	$9{,}10 \cdot 10^{-6}$	21 ± 4	0,91 ± 0,09	1,8 ± 0,1	0,1	0,54	1,98
VI	10	10.09.2020	–281,2	8,43	2866	$4{,}09 \cdot 10^{-6}$	$9{,}10 \cdot 10^{-6}$	22 ± 3	1,03 ± 0,09	1,5 ± 0,1	1 ± 0	2,23	1,46
VI	11	17.07.2019	113,1	7,54	2854	$2{,}43 \cdot 10^{-5}$	$8{,}14 \cdot 10^{-6}$	–	–	–	0,1	0,33	–
VII	12	17.07.2019	152,8	7,47	1541	$2{,}12 \cdot 10^{-3}$	$1{,}28 \cdot 10^{-5}$	–	–	–	0,1	$6{,}05 \cdot 10^{-3}$	–
VII	13	17.07.2019	145,3	7,36	1683	$1{,}84 \cdot 10^{-3}$	$4{,}07 \cdot 10^{-6}$	–	–	–	0,1	$2{,}22 \cdot 10^{-3}$	–
VIII	14	06.09.2020	–85,8	9,12	1873	$1{,}22 \cdot 10^{-5}$	$4{,}34 \cdot 10^{-5}$	–	–	–	0,1	3,55	–
IX	15	21.09.2020	–229,7	8,37	525	$1{,}46 \cdot 10^{-5}$	$4{,}59 \cdot 10^{-6}$	22 ± 6	0,5 ± 0,05	0,74 ± 0,06	4 ± 1	0,31	1,48
IX	15	28.09.2019	–268,2	8,44	463	$1{,}25 \cdot 10^{-5}$	$4{,}42 \cdot 10^{-6}$	–	–	–	7 ± 2	0,36	–
IX	16	21.09.2020	–146,2	7,78	483	$4{,}19 \cdot 10^{-6}$	$2{,}49 \cdot 10^{-5}$	42 ± 8	0,45 ± 0,05	0,63 ± 0,06	4 ± 1	5,94	1,40
IX	16	29.09.2019	–175,2	7,91	427	$4{,}36 \cdot 10^{-6}$	$2{,}52 \cdot 10^{-5}$	–	–	–	4 ± 1	5,79	–
IX	17	11.09.2020	150,2	7,47	624	$8{,}62 \cdot 10^{-4}$	$1{,}18 \cdot 10^{-6}$	14 ± 5	11 ± 1	22 ± 1	4 ± 1	$1{,}37 \cdot 10^{-3}$	2,00
IX	18	04.09.2020	158,5	7,44	511	$3{,}14 \cdot 10^{-4}$	$2{,}32 \cdot 10^{-6}$	14 ± 4	4,9 ± 0,5	8,4 ± 0,7	3 ± 0	$7{,}40 \cdot 10^{-3}$	1,71
IX	19	27.09.2019	33,4	7,04	865	$3{,}75 \cdot 10^{-4}$	$4{,}07 \cdot 10^{-7}$	–	–	–	0,1	$1{,}09 \cdot 10^{-3}$	–
X	20	16.09.2020	–267,4	7,39	3317	$5{,}52 \cdot 10^{-5}$	$9{,}10 \cdot 10^{-6}$	17 ± 4	1,05 ± 0,09	2,3 ± 0,1	6 ± 1	0,17	2,19
XI	21	18.09.2020	22,1	8,01	202962	$5{,}91 \cdot 10^{-2}$	$3{,}70 \cdot 10^{-5}$	–	–	–	0,1	$6{,}26 \cdot 10^{-4}$	–
XI	22	18.09.2020	–22,3	7,88	190065	$1{,}97 \cdot 10^{-2}$	$3{,}81 \cdot 10^{-5}$	–	–	–	0,1	$1{,}93 \cdot 10^{-3}$	–
XII	23	21.09.2020	–164,7	7,88	770	$6{,}29 \cdot 10^{-7}$	$7{,}06 \cdot 10^{-7}$	55 ± 8	0,27 ± 0,07	0,68 ± 0,11	13 ± 5	1,12	2,52

«–» данные отсутствуют.

полнительных полевых исследований (содержания сероводорода, углекислого газа и радона), которые будут выполнены в 2021 году.

Исследованные минеральные воды в соответствии с [9] были разделены на пять групп: 1) минеральные питьевые столовые (5 проявлений); 2) минеральные питьевые лечебные (Айвазовское месторождение); 3) минеральные питьевые лечебно-столовые (месторождения: Сакское, Евпаторийское, Судакское и Феодосийское; 6 проявлений); 4) маломинерализованные воды Аджи-Су; 5) рапа Сакского озера. Их местоположение и разделение на бальнеологические типы приведено на рис. 1. Дадим краткую характеристику выделенных групп, включая особенности их радионуклидного состава.

Пять проявлений **минеральных питьевых столовых вод** были изучены с бальнеологической точки зрения впервые (№ 15–19, рис. 1). Они характеризуются преимущественно SO_4–HCO_3 Mg–Ca–Na составом с величиной общей минерализации 427–865 мг/дм³ и содержанием кремния 3,48–17,01 мг/дм³. Геохимические параметры среды изменяются от восстановительных до окислительных с Eh –268,2 – +158,5 мВ, pH 7,0 – 8,44, содержанием $O_{2раств.}$ 1,79–6,92 мг/дм³. Для установления типа вод и бальнеологической группы необходимы дополнительные исследования. Суммарная β-активность составляет 14–42 мБк/дм³. Активность ^{222}Rn изменяется в диапазоне от 3 до 7 Бк/дм³. Установлено, что природные радионуклиды содержатся в следующих пределах (мг/дм³): ^{238}U от $4{,}19 \cdot 10^{-6}$ до $8{,}62 \cdot 10^{-4}$ и ^{232}Th от $4{,}07 \cdot 10^{-7}$ до $2{,}52 \cdot 10^{-5}$ (табл. 1). $^{232}Th/^{238}U$ отношение в водах варьирует в интервале от $1{,}09 \cdot 10^{-3}$ до 5,94. Постоянство $^{238}U/^{235}U$ экспериментально доказано практически для всех природных объектов, тогда как отношение четных изотопов урана $^{234}U/^{238}U$ в природных водах сильно варьирует [3, 18]. Поэтому в практике гидрогеологических исследований используют величину γ, равную отношению удельных активностей A_{234}/A_{238} в исследуемых образцах. При ненарушенном радиоактивном равновесии γ = 1, если в системе имеется избыток ^{234}U, то γ > 1, а при его недостатке γ < 1. Уранизотопное отношение (γ) $^{234}U/^{238}U$ варьирует в интервале от 1,4 до 2, при активности изотопов урана (мБк/дм³): ^{234}U (0,63–22), ^{238}U (0,45–11).

Воды второй разновидности минеральные питьевые лечебные Айвазовского месторождения (№ 1, рис. 1) HCO_3–Cl Na состава с величиной общей минерализации 1706 мг/дм³ и содержанием кремния 16,17 мг/дм³. Геохимические параметры среды восстановительные с Eh –330,2 мВ, pH 8,2, содержанием $O_{2раств.}$ 0,79 мг/дм³. Суммарная β-активность равна 10 мБк/дм³. Активность ^{222}Rn составляет 1 Бк/дм³. Содержания ^{238}U составляют $1{,}50 \cdot 10^{-6}$, а ^{232}Th – $1{,}50 \cdot 10^{-4}$ мг/дм³ (табл. 1). $^{232}Th/^{238}U$ отношение в водах составляет 0,1. Уранизотопное отношение (γ) $^{234}U/^{238}U$ составляет 1,67, при активности изотопов урана (мБк/дм³): ^{234}U (0,3), ^{238}U (0,18).

Воды третьей группы минеральные питьевые лечебно-столовые, характеризующиеся довольно изменчивым химическим составом с преобладающим Cl Na типом и величиной общей минерализации 1098–9038 мг/дм³ и содержанием кремния 1,19–9,20 мг/дм³ (№ 2–14, рис. 1). Геохимические параметры среды изменяются от восстановительных до окислительных с Eh –302,5 – +152,8 мВ, pH 7,3–9,1, содержанием $O_{2раств.}$ 1,18–6,48 мг/дм³. Суммарная β-активность варьирует в широком диапазоне от 21 до 128 мБк/дм³. Активность ^{222}Rn изменяется от 0,1 до 5 Бк/дм³. Природные радионуклиды содержатся в следующих концентрациях (мг/дм³): ^{238}U от $3{,}90 \cdot 10^{-6}$ до $2{,}12 \cdot 10^{-3}$ и ^{232}Th от $1{,}18 \cdot 10^{-6}$ до $4{,}69 \cdot 10^{-4}$ (табл. 1). $^{232}Th/^{238}U$ отношение в водах варьирует в интервале от $2{,}22 \cdot 10^{-3}$ до 6,15. Уранизотопное отношение (γ) $^{234}U/^{238}U$ изменяется в интервале от 1,45 до 7,08, при активности изотопов урана (мБк/дм³): ^{234}U (1,3–46), ^{238}U (0,36–6,5).

Четвертая разновидность представлена минеральными водами источника Аджи-Су (№ 20, рис. 1). Воды характеризуются Cl Ca–Na составом с величиной общей минерализации 3317 мг/дм³ и содержанием кремния 8,44 мг/дм³. Геохимические параметры среды окислительные с Eh –267,4 мВ, pH 7,4, содержанием $O_{2раств}$. 2,39–6,48 мг/дм³. Суммарная β-активность равна 17 мБк/дм³. Активность ^{222}Rn составляет 6 Бк/дм³, что требует дополнительных полевых исследований. Содержания ^{238}U составляют $5{,}52 \cdot 10^{-5}$, а ^{232}Th – $9{,}10 \cdot 10^{-6}$ мг/дм³ (табл. 1). $^{232}Th/^{238}U$ отношение в водах составляет 0,17. Уранизотопное отношение (γ) $^{234}U/^{238}U$ составляет 2,19, при активности изотопов урана (мБк/дм³): ^{234}U (2,3), ^{238}U (1,05). Это свидетельствует о неглубокой циркуляции этих вод.

Воды пятой группы представлены рапой Сакского озера (№ 21–22, рис. 1) с SO_4–Cl Mg–Na составом и величиной общей минерализации 190 – 203 г/дм³, с содержанием кремния не превышающем 4,77 мг/дм³. Геохимические параметры среды изменяются от слабовосстановительных до слабоокислительных с Eh –22,3 – +22,1 мВ, pH 7,9–8,0, содержанием $O_{2раств.}$ 3,36–5,33 мг/дм³. Согласно медицинским показаниям по уровню минерализации и наличию бальнеологически ценных компонентов озерная вода может использоваться наружно (в виде ванн) при болезнях системы кровообращения, нервной системы, костно-мышечной системы, органов пищеварения эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ, мочеполовой системы и болезнях кожи. Природные радионуклиды содержатся в следующих концентрациях (мг/дм³): ^{238}U от $1{,}97 \cdot 10^{-2}$ до $5{,}91 \cdot 10^{-2}$ и ^{232}Th от $3{,}70 \cdot 10^{-5}$ до $3{,}81 \cdot 10^{-5}$ (табл. 1). $^{232}Th/^{238}U$ отношение в водах варьирует в интервале от $6{,}26 \cdot 10^{-4}$ до $1{,}93 \cdot 10^{-3}$.

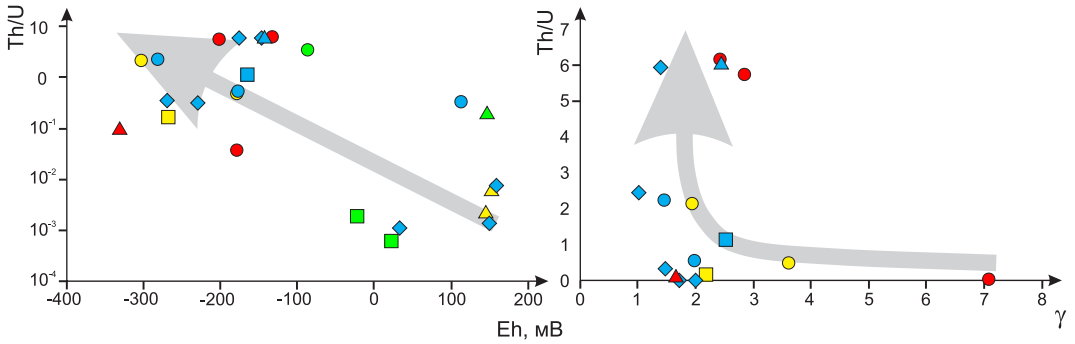


Рис. 2. Зависимость Th/U отношения от величины окислительно-восстановительного потенциала и уранизотопного отношения в минеральных водах Крымского полуострова

Условные обозначения см. рис. 1.

Заключение

Резюмируя вышесказанное, отметим, что бальнеологические ресурсы Крымского полуострова в настоящее время крайне слабо изучены. Этот вопрос требует пристального внимания со стороны научных, производственных организаций и региональных властей, поскольку Крым необходимо в полной мере сделать круглогодичным курортом. Обширный материал, полученный авторами в течение последних лет позволил выявить семь ранее не известных проявлений минеральных вод и впервые дать характеристику их радионуклидного состава.

Установлено, что поведение тория и урана в изученных минеральных водах в первую очередь определяется геохимическими параметрами среды. Торий мигрирует в восстановительной среде, а уран в окислительной, где первый образует гидроокислы и осаждается со вторичными минералами (рис. 2а). Этот факт подтверждается на множестве объектов [6–7, 11]. Закономерно смена окислительных обстановок на восстановительные в изученных минеральных водах приводит к росту $^{232}Th/^{238}U$ отношения от 10^{-3} – 0,1 в первом случае, до 0,1–10 – во втором. Обратная зависимость просматривается при анализе значений уранизотопного отношения, чем ниже его значения, тем глубже циркуляция этих вод и гидрогеологическая закрытость недр (рис. 2б). Так, минеральные воды Айвазовского, Феодосийского месторождений и проявления у с. Глубокий Яр по величине γ соответствуют наибольшим глубинам циркуляции из изученных объектов. Также, минеральные воды проявления у с. Глубокий Яр характеризуются высоким отношением $^{232}Th/^{238}U$ = 5,9. В целом для исследуемого региона наблюдается рост содержаний урана с величиной общей минерализации природных вод, что особенно заметно в рапе Сакского озера, где за счет процессов солнечного концентрирования его концентрации достигают $1{,}97 \cdot 10^{-2} – 5{,}91 \cdot 10^{-2}$ мг/дм^3. Уран мигрирует в окислительных обстановках преимущественно в виде анионных комплексов $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ и $UO_2(CO_3)_2^{2-}$, в меньшей степени (< 1 % от общего содержания) в виде $Ca_2UO_2(CO_3)_3(aq)$ и $CaUO_2(CO_3)_3^{2-}$. Экспериментальные и теоретические исследования форм, растворимости и сорбции тория в водах с низкой ионной силой говорят о том, что он может находится в форме ThO_2 или $Th(OH)_3CO_3^-$ [12].

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025, РФФИ и города Севастополь в рамках гранта № 18-45-920032 р_а и Государственного Задания РФ «Наука» в рамках проекта № FSWW-0022-2020.

Литература

1. Nichkova L. A., Geochemistry of natural waters of the Baydar valley (Crimean Peninsula) / L. A. Nichkova, D. A. Novikov, A. V. Chernykh, F. F. Dultsev, G. A. Sigora, T. Yu. Khomenko // E3S Web of Conferences, 2019. – V. 98. – № 01036.
2. Novikov D. A. Distribution of the stable isotopes (δ18O, δD и δ13C) in natural waters of the Baydar valley (Crimean Peninsula) / D. A. Novikov, L. A. Nichkova, A. V. Chernykh, F. F. Dultsev, A. N. Pyryaev, G. A. Sigora, T. Yu. Khomenko // E3S Web of Conferences, 2019. – V. 98. – № 01038.
3. Osmond J. K. The theory and uses natural uranium isotopic Variations in hydrology / J. K. Osmond, J. B. Gowart // Atomic Energy Review, 1976. – V. 144. – P. 621–679.
4. Амеличев Г. Н., Комплексная оценка возраста и установление условий формирования минеральных вод «Бишули» (равнинный Крым) на основе изотопно-геохимических данных / Г. Н. Амеличев, И. В. Токарев, С. В. Токарев, И. А. Крайнюкова, Н. С. Бурлакова // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология, 2017. – Т. 3 (69). – № 2. – С. 130–150.

5. Бабова К. Д. Справочник Минеральные лечебно-столовые воды Украины / К. Д. Бабова, М. В. Лобода, Е. М Никипелова. – Коломия, 1998. – 207 с.
6. Баранов В. И. Радиогеология / В. И. Баранов, Н. А. Титаева. – Москва: Издательство Московского университета, 1973. – 124 с.
7. Геологический словарь: в 2-х томах. – Москва: Недра. Под редакцией К. Н. Паффенгольца и др., 1973. – 272 с.
8. Гидрогеология СССР. Том VIII. Крым / Гл. редактор академик А. В. Сидоренко. – Москва: Издательство «Недра», 1971. – 55 с.
9. ГОСТ Р 54316-2020 Воды минеральные природные питьевые. Общие технические условия: Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. – Москва: Стандартинформ, 2020.
10. Кайсинова А. С. Химический состав и свойства минеральной воды «Бишули» (с. Пятихатка Красногвардейский район, республика Крым) и возможности её использования в бальнеологических целях / А. С. Кайсинова, А. Н. Глухов, С. Р. Данилов, Ф. И. Текеева // Курортная медицина, 2016. – № 4. – С. 13–17.
11. Копылова Ю. Г. Уран и торий в природных водах юго-востока Алтае-Саянской области / Ю. Г. Копылова, Н. В. Гусева, К. Д. Аракчаа, А. А. Хващевская, И. С. Мазурова, О. Д. Аюнова, Ч. К. Ойдуп, К. М. Рычкова // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Международной конференции, 13–16 сентября 2016 г., г. Томск. – Томск, 2016. – С. 339–345.
12. Новиков Д. А. Поведение природных радионуклидов в водах Байдарской долины (Крымский полуостров) / Д. А. Новиков, Т. В. Корнеева // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: Материалы XVI международной научной конференции, г. Новосибирск, 20–24 апреля 2020 г., – С. 165–178.
13. Новиков Д. А. Новые изотопно-гидрогеохимические данные по составу природных вод Байдарской долины (Крымский полуостров) / Д. А. Новиков, Ю. Г. Копылова, А. В. Черных, Ф. Ф. Дульцев, А. Н. Пыряев, А. А. Хващевская, Л. А. Ничкова, Г. А. Сигора, Т. А. Яхин // Геология и геофизика, 2020, DOI: 10.15372/GiG2020137.
14. Новиков Д. А. Геохимические типы природных вод Байдарской долины (Крымский полуостров) / Д. А. Новиков, Ю. Г. Копылова, А. В. Черных, Ф. Ф. Дульцев, А. А. Хващевская // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 2020. – № 17. – С. 401–405.
15. Новиков Д. А. Новый взгляд на гидрогеологические условия города федерального значения Севастополь / Д. А. Новиков, А. В. Черных, Ф. Ф. Дульцев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2019. – Т. 330. – № 8. – С. 105–122.
16. Новиков Д. А. Оценка качества подземных вод верхнеюрских отложений юго-западных районов Крымского полуострова для целей питьевого и сельскохозяйственного водоснабжения / Д. А. Новиков, А. В. Черных, Ф. Ф. Дульцев // Экология и промышленность России, 2019. – Т. 23. – № 4. – С. 52–57.
17. Обзор минеральных вод Украинской ССР / А. С. Алексеева, В. Д. Овчарова, Н. А. Лысак. – Киев: Издательство Центральной тематической экспедиции Министерства геологии УССР, 1980. – 770 с.
18. Чалов П. И. Неравновесный уран как индикатор при изучении процессов формирования и циркуляции подземных вод / П. И. Чалов, Т. В. Тузова, А. И. Тихонов, К. И. Меркулова, Н. А. Светличная // Геохимия, 1979. – № 10. – С. 1499–1507.

РАДИОНУКЛИДНЫЙ СОСТАВ ПРИРОДНЫХ ВОД НОВОСИБИРСКОЙ ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

Д. А. Новиков[1], А. С. Деркачев[1], А. А. Максимова[1], Ф. Ф. Дульцев[1], А. А. Хващевская[2], А. Ф. Сухорукова[1], А. В. Черных[1]

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН
Новосибирск, Россия, NovikovDA@ipgg.sbras.ru
[2]Томский политехнический университет
Томск, Россия, unpc_voda@mail.ru

RADIONUCLIDES COMPOSITION OF THE NATURAL WATERS IN THE NOVOSIBIRSK AREA

D. A. Novikov[1], A. S. Derkachev[1], A. A. Maksimova[1], F. F. Dultsev[1], A. A. Khvashchevskaya[2], A. F. Sukhorukova[1], A. V. Chernykh[1]

[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS
Novosibirsk, Russia, NovikovDA@ipgg.sbras.ru
[2]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, unpc_voda@mail.ru

Results of the studies of ^{238}U, ^{232}Th, ^{226}Ra and ^{222}Rn distribution in the natural waters of the Novosibirsk Area are presented. Dominating in chemical composition are HCO_3 Mg–Ca, HCO_3 Na–Mg–Ca и SO_4–HCO_3 Na–Mg–Ca waters with TDS 127 to 1568 mg/dm^3, and silicon content 0.14 to 17.63 mg/dm^3. These waters are characterized by pH from neutral to alkaline (6.6–9.5). The values of Eh vary from reductive –164.2 mV to oxidative +509.5 mV with dissolved oxygen content $O_{2dissolved}$ within the range of 0.16–20.78 mg/dm^3. The concentrations of natural radionuclides are (mg/dm^3): ^{238}U ($2.70 \cdot 10^{-6} – 6.5$), ^{232}Th ($1.86 \cdot 10^{-7} – 2.16 \cdot 10^{-3}$), ^{226}Ra ($2.46 \cdot 10^{-10} – 3.7 \cdot 10^{-7}$). The activity of radon (^{222}Rn) varies within a broad range from 1 to 43764 Bq/dm^3. The $^{232}Th/^{238}U$ ratio varies from $2.63 \cdot 10^{-5}$ to 2.96. The nature of radioactivity of the studied waters is due mainly to uranium because the waters are characterized by the oxidative parameters of the geochemical medium, with maximum uranium concentrations in the scattering halo of the Prigorodnoe deposit.

Введение

Россия является одной из законодательниц в изучении радионуклидного состава природных вод. В. И. Вернадскому в истории Академии наук принадлежит научное начинание по изучению радиоактивных элементов и организации поисков радиоактивных руд на ее территории. Вскоре после открытия радия М. Кюри-Складовской он едет за границу изучать новый элемент, а в 1909 году поднимает вопрос о поисках в России радиоактивных элементов и руд. Он основал в 1922 году Радиевый Институт и был первым его директором [15]. Таким образом, наравне с гидрогеохимией [4], возникло новое научное направление. ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th – три природных актинида, сохранившиеся до наших дней в значительных количествах на планете, которые медленно трансформируются в стабильные изотопы свинца. При этом цепочки распада включают целый ряд нестабильных нуклидов. За единственным исключением все они являются нелетучими элементами. Этим исключением является радон, благородный газ, способный к активному перемещению в окружающей среде как путем диффузии, так и конвекции после выделения из матрицы твердого тела. В зависимости от геологических и гидрогеологических условий в различных регионах Земли созданы природные условия для формирования широкого спектра фоновых концентраций радионуклидов.

На территории Новосибирской городской агломерации (НГА) и в ее окрестностях широко распространены радоновые воды. Распределение ^{222}Rn обусловлено наличием рассеянных радиоактивных минералов в гранитоидных массивах, расположенных в изучаемом регионе. В 1980–90-е годы здесь открыто более десяти месторождений радоновых вод (Заельцовское, Южно-Колыванское, Станиславское и др.). Наибольший вклад в изучение гидрогеологических условий региона внесли И. П. Карпицкий, Е. К. Вериго, В. С. Кусковский, Г. Л. Самсонов, Н. К. Ахмеджанова, С. В. Шабанов, И. П. Карпинский, П. Л. Макидон, Т. В. Терехова, Е. П. Виценко, Б. Л. Врабий, Н. Н. Бусоргина, М. Н. Козлова, В. П. Мочалов и многие другие. Как показали результаты геологоразведочных работ содержание радона в подземных водах НГА варьирует от 0,1 до 43764,6 Бк/дм^3. Выявленные месторождения радоновых вод к настоящему времени крайне слабо описаны в научной литературе [2, 3, 5, 13, 14]. Последние сведения приводятся в работах [6–9, 11–12, 16–18].

В настоящей работе приводятся результаты обобщения архивных и новых данных по распре-

делению ^{238}U, ^{232}Th, ^{226}Ra и ^{222}Rn в природных водах НГА, распространенных в четвертичных, неогеновых, палеогеновых и верхнедевонско-нижнекаменноугольных отложениях, а также в верхнепалеозойских гранитах. Местоположение объектов, изученных во время полевых сезонов 2018–2020 гг. показано на рисунке 1.

Фактический материал и методика исследований

Непосредственно на объектах было выполнено определение pH, Eh, температуры, содержания растворенного O_2, HCO_3^- с помощью оборудования (Hanna HI9125, кислородомер АКПМ-1-02Л) и полевой гидрогеохимической лаборатории. Измерение содержаний ^{222}Rn в водах проводилось на комплексе «Альфарад плюс» в лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН. Изучение химического состава вод проводилось методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП), в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ.

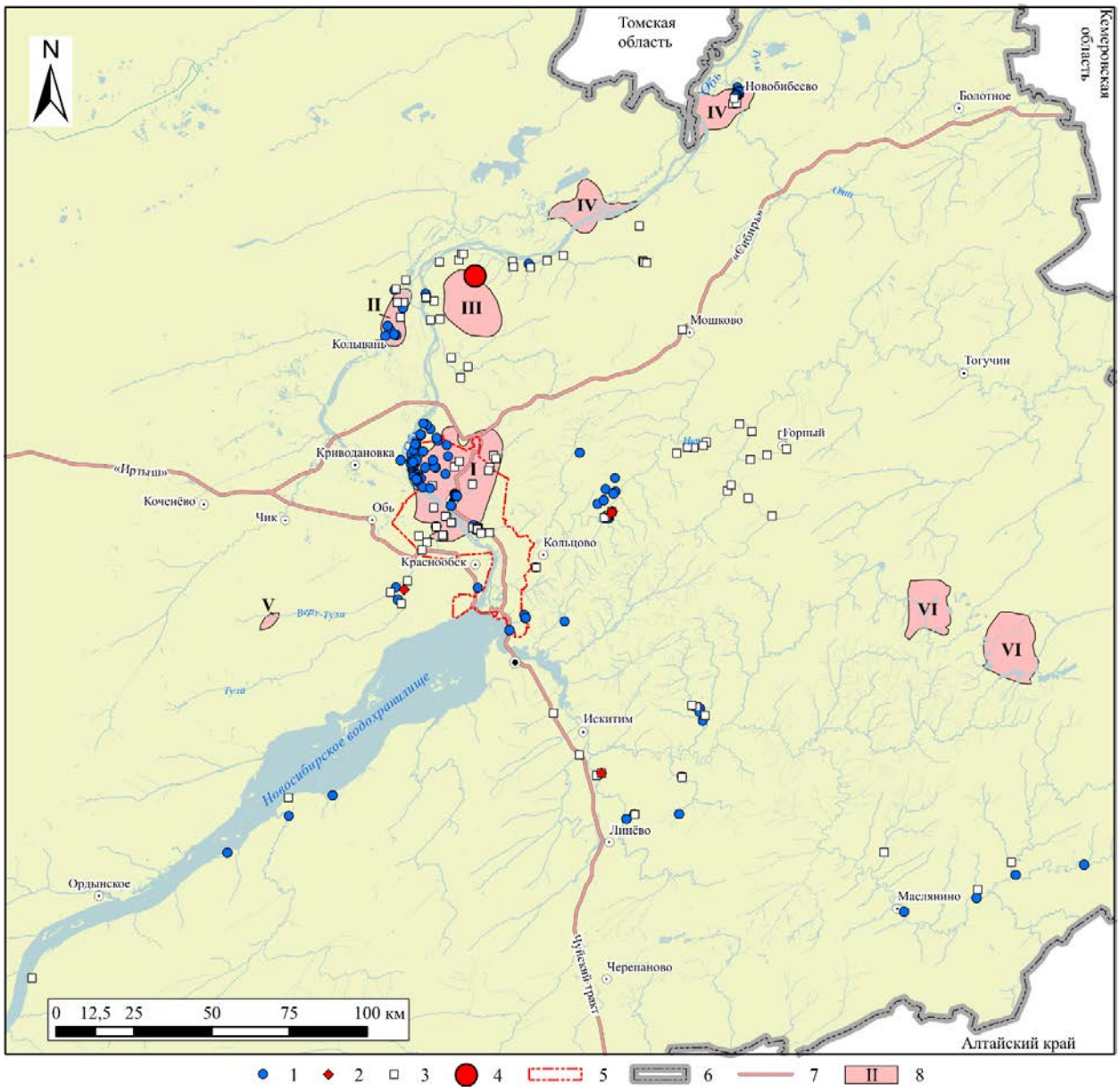


Рис. 1. Местоположение изученных объектов в пределах НГА и окрестностях

1–3: типы исследованных водопунктов: 1 – скважины; 2- источники; 3 – поверхностные воды; 4 – месторождение урана «Пригородное»; 5 – граница Новосибирска; 6 – граница Новосибирской области; 7 – федеральные трассы; 8 – гранитоидные массивы (I – Новосибирский; II – Колыванский; III–IV – Обской; V – Верхнечикский, VI – Порожнинская серия гранитоидных комплексов.

Особенности гидрогеологического строения территории

В региональном масштабе изученная территория относится к западным краевым структурам Алтае-Саянской складчатой области (АССО): Колывань-Томской складчатой системе Обь-Зайсанской области герцинид и Салаирской складчатой зоне Алтае-Салаирской складчатой системы в пределах Алтае-Саянской области каледонид. Расположение исследуемой территории в зоне сочленения АССО и Западно-Сибирской плиты проявлено в гидрогеологическом районировании: территория разделена между Западно-Сибирским артезианским бассейном и Салаиро-Кузнецким гидрогеологическим районом, граница которых здесь примерно соответствует долине реки Обь [1]. В целом, характерно двухъярусное строение: палеозойский фундамент, прорванный верхнепалеозойскими интрузиями, в основном гранитоидного состава, перекрывается осадочным чехлом мезозойско-кайнозойского возраста. Соответственно, выделяется два гидрогеологических комплекса: палеозойского фундамента и рыхлых кайнозойских отложений. Их стратиграфическое наполнение изменяется на различных участках, однако принципиальные черты строения для всей области исследований сохраняются.

Геохимия природных вод

Изученные объекты отличаются контрастными геологическими и гидрогеологическими условиями (гранитные массивы, осадочные породы с возрастом от неогена до кембрия). Было изучено две группы водопунктов: 1) подземные воды из скважин и источников и 2) поверхностные воды озер и рек. Причем в геохимическом плане объекты рассмотрены с учетом их геологического строения: в области распространения гранитоидов и в районах их отсутствия – развития разновозрастных осадочных пород.

Районы распространения гранитоидов. Подземные воды из скважин нецентрализованного водоснабжения характеризуются HCO_3 Mg–Ca и SO_4–HCO_3 Na–Mg–Ca составом с величиной общей минерализации 139–1568 мг/дм³ и содержанием кремния 0,89–15,06 мг/дм³. Геохимические параметры среды изменяются от восстановительных до окислительных с Eh –81,2 – +509,5 мВ, значения pH от нейтральных (6,6) до слабощелочных (8,5), содержание $O_{2раств.}$ 1,12–11,43 мг/дм³. По средним геохимическим коэффициентам (Ca/Si 17,24; Mg/Si 3,78; Na/Si 4,20; Mg/Na 1,92; Si/Na 1,28; Ca/Na 8,31; Ca/Mg 5,67; rNa/rCl 3,02; SO_4/Cl 2,95) можно отметить, что во вмещающих горных породах протекают процессы окисления сульфидов и присутствуют алюмосиликаты с повышенной долей кальция. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм³) (рис. 2): ^{238}U от $5{,}76 \cdot 10^{-6}$ до 6,50, ^{232}Th от $1{,}86 \cdot 10^{-7}$ до $2{,}96 \cdot 10^{-4}$ и ^{226}Ra от $4{,}93 \cdot 10^{-10}$ до $1{,}70 \cdot 10^{-8}$. Отношение $^{232}Th/^{238}U$ варьирует в интервале от $2{,}63 \cdot 10^{-5}$ до 0,21, при среднем 0,01. Активность ^{222}Rn изменяется в широких пределах от 1 до 43764 Бк/дм³, при среднем значении 5061 Бк/дм³.

Поверхностные воды имеют тот же состав (SO_4–HCO_3 Na–Mg–Ca и HCO_3 Mg–Ca). Величина общей минерализации изменяется в интервале 158–910 мг/дм³, а содержания кремния варьируют от 0,18 до 10,22 мг/дм³. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке со значениями Eh +88,7 – +344,0 мВ, pH от нейтральных (6,9) до слабощелочных (9,4) и концентрациями $O_{2раств.}$ 3,49–20,28 мг/дм³. Величины средних геохимических коэффициентов составляют: Ca/Si 39,52; Mg/Si 16,13; Na/Si 21,84; Mg/Na 2,46; Si/Na 0,87; Ca/Na 16,79; Ca/Mg 5,30; rNa/rCl 3,50; SO_4/Cl 4,76, что свидетельствует о росте антропогенной нагрузки на некоторые объекты. Этот процесс проявлен ростом относительных концентраций натрия в катионном составе вод. Содержания радионуклидов варьируют (мг/дм³): ^{238}U от $3{,}70 \cdot 10^{-4}$ до 1,21, ^{232}Th от $5{,}00 \cdot 10^{-7}$ до $2{,}16 \cdot 10^{-3}$. Отношение $^{232}Th/^{238}U$ изменяется в интервале от $1{,}04 \cdot 10^{-4}$ до $1{,}61 \cdot 10^{-2}$, при среднем $3{,}06 \cdot 10^{-3}$. Активность ^{222}Rn находится в широких пределах от 1 до 259 Бк/дм³, при среднем значении 37 Бк/дм³.

Районы развития разновозрастных осадочных пород. Подземные воды характеризуются преимущественно HCO_3 Na–Mg–Ca и HCO_3 Mg–Ca составом с величиной общей минерализации, варьирующей от 127 до 973 мг/дм³ и содержанием кремния 0,26–17,63 мг/дм³. Геохимические параметры среды изменяются от восстановительных до окислительных с Eh –164,3 – +442,1мВ, значения pH нейтральные – слабощелочные (6,9–8,5), содержания $O_{2раств.}$ 0,16–19,20 мг/дм³. Величины средних геохимических коэффициентов возрастают в сравнении с трещинно-жильными водами гранитоидов, описанными выше у Na/Si 5,16; rNa/rCl 7,98; SO4/Cl 4,28, снижаются у Ca/Si 16,97; Mg/Na 1,28; Si/Na 0,47; Ca/Na 6,26, сопоставимые величины отмечаются у Mg/Si 3,88; Ca/Mg 5,36, поэтому можно предположить, что накопление в растворе кальция и натрия связано с процессами взаимодействия вод с Ca- и Na-алюмосиликатами. Также, можно предполагать высокую роль карбонатных пород в обогащении вод кальцием. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм³): ^{238}U от $2{,}70 \cdot 10^{-6}$ до $9{,}80 \cdot 10^{-2}$, ^{232}Th от $2{,}13 \cdot 10^{-7}$ до $5{,}57 \cdot 10^{-4}$ и ^{226}Ra от $1{,}30 \cdot 10^{-9}$ до $6{,}76 \cdot 10^{-9}$. Отношение $^{232}Th/^{238}U$ варьирует в интервале от $8{,}08 \cdot 10^{-5}$ до 2,96, при среднем 0,17. Активность ^{222}Rn изменяется в широких пределах от 1 до 686 Бк/дм³, при среднем значении 122 Бк/дм³.

Особый интерес представляют воды из шести источников. Воды Святого источника, находящегося в селе Верх-Тула, являются фоновыми зоны региональной трещиноватости [10] и отвечают восстановительной обстановке с Eh от –64,0 до –27,8 мВ, pH 7,4–7,6 и $O_{2раств.}$ 0,54–2,09 мг/дм³. Они характеризуются HCO_3 Na–Mg–Ca составом с величиной общей минерали-

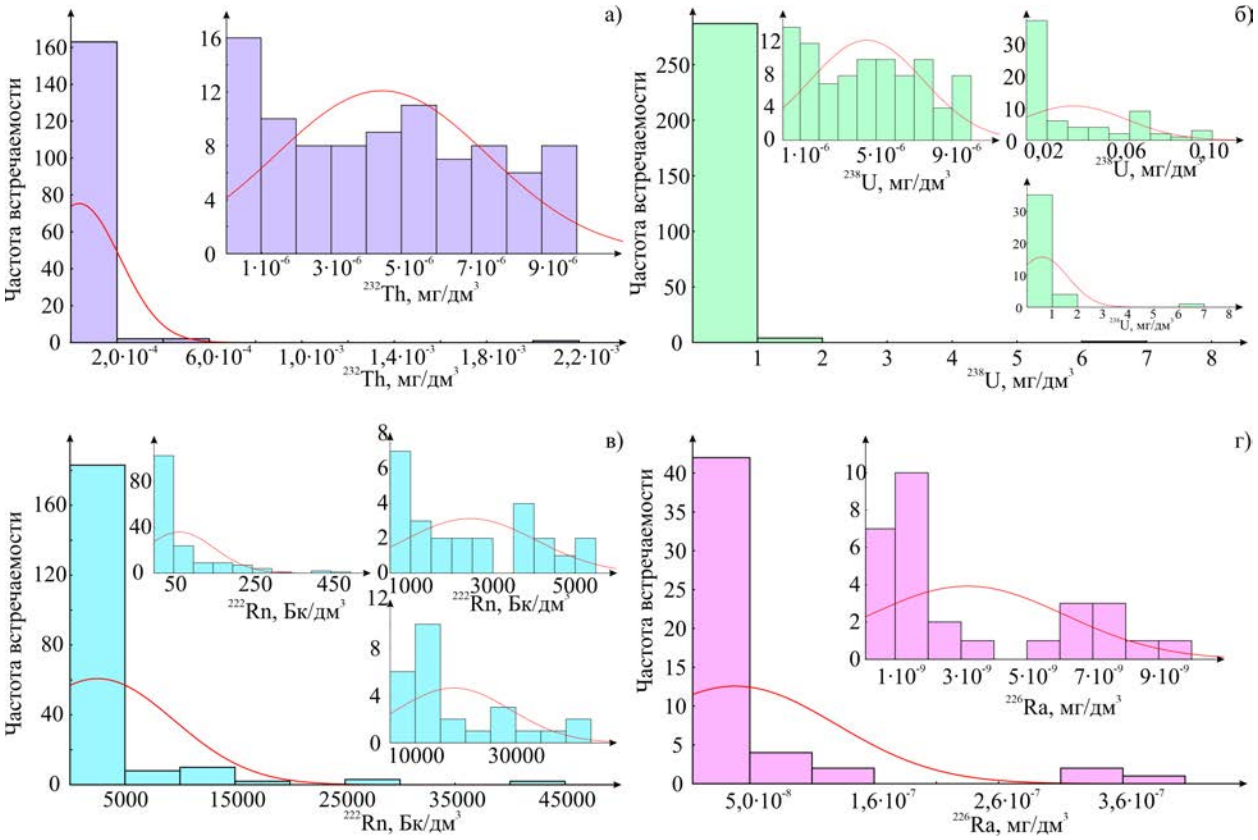


Рис. 2. Распределение тория (а), урана (б), радона (в) и радия (г) в природных водах НГА

зации 587–714 мг/дм^3 и содержанием кремния 4,07–7,04 мг/дм^3. Средние геохимические коэффициенты для этого источника составляют: Ca/Si 16,24; Mg/Si 6,19; Na/Si 5,79; Mg/Na 1,03; Si/Na 0,18; Ca/Na 2,81; Ca/Mg 2,84; rNa/rCl 22,51; SO4/Cl 4,85. Воды Инских источников и Святого источника в поселке Ложок обладают окислительными параметрами среды (Eh +184,4 – +222,5 мВ), pH 7,1–8,4 и содержанием $O_{2расств.}$ 5,69–12,26 мг/дм^3. Они HCO_3 Mg–Ca состава с величиной общей минерализации от 389 до 548 мг/дм^3 и содержанием кремния 4,14–8,61 мг/дм^3. Средние значения геохимических коэффициентов возрастают у Mg/Na 2,29; Si/Na 0,94; Ca/Na 11,99; Ca/Mg 5,61 и снижаются у Ca/Si 13,46; Mg/Si 2,57; Na/Si 1,35; rNa/rCl 2,80; SO4/Cl 2,89. Содержания радионуклидов во всех источниках составляют (мг/дм^3): ^{238}U от 2,83 • 10^{-3} до 7,26 • 10^{-3}, ^{232}Th от 3,01 • 10^{-7} до 2,41 • 10^{-5} и ^{226}Ra от 2,46 • 10^{-10} до 4,93 • 10^{-10}. Отношение ^{232}Th/^{238}U варьирует в интервале от 6,38 • 10^{-5} до 4,29 • 10^{-3}, при среднем 1,85 • 10^{-3}. Активность ^{222}Rn составляет 5–130 Бк/дм^3, при среднем значении 55 Бк/дм^3.

Поверхностные воды характеризуются преимущественно HCO_3 Mg–Ca и HCO_3 Na–Mg–Ca составом с величиной общей минерализации, варьирующей от 149 до 1171 мг/дм^3 и содержанием кремния 0,14–12,67 мг/дм^3. Условия отвечают геохимической окислительной среде со значениями Eh +44,6 – +280,0 мВ, pH от нейтральных (7,0) до щелочных (9,5), содержаниями $O_{2раств.}$ от 0,90 до 20,78 мг/дм^3. Средние значения практически всех геохимических коэффициентов возрастают относительно поверхностных вод описанных выше: Ca/Si 51,85; Mg/Si 20,57; Na/Si 51,54; Mg/Na 4,05; Si/Na 4,01; Ca/Na 33,07; rNa/rCl 6,90; SO_4/Cl 5,35, снижается отношение Ca/Mg 4,25. Это указывает на большое разнообразие дренируемых пород и влияние процессов антропогенного загрязнения. Концентрации радионуклидов варьируют (мг/дм^3): ^{238}U от 1,00 • 10^{-4} до 5,48 • 10^{-2}, ^{232}Th от 1,18 • 10^{-6} до 4,47 • 10^{-4}. Отношение ^{232}Th/^{238}U изменяется от 5,63 • 10^{-4} до 0,25, при среднем 0,01. Активность ^{222}Rn варьирует от 1 до 86 Бк/дм^3, при среднем значении 12 Бк/дм^3.

Заключение

Резюмируя вышесказанное необходимо отметить следующее. Природные воды Новосибирской городской агломерации крайне разнообразны по химическому составу, при доминировании HCO_3 Mg–Ca, HCO_3 Na–Mg–Ca и SO_4–HCO_3 Na–Mg–Ca типов. Величина общей минерализации варьирует в широких пределах от 127 до 1568 мг/дм^3, содержания кремния изменяются от 0,14 до 17,63 мг/дм^3. Природные воды характеризуются pH от нейтральных до щелочных (6,6–9,5). Величины Eh варьируют от восстановительных –164,2 мВ до окислительных +509,5 мВ с содержанием $O_{2раств.}$ 0,16–20,78 мг/дм^3. Концентрации природных радионуклидов изменяются в большом интервале (мг/дм^3): ^{238}U (2,70 • 10^{-6} – 6,5), ^{232}Th

($1{,}86 \cdot 10^{-7} – 2{,}16 \cdot 10^{-3}$), ^{226}Ra ($2{,}46 \cdot 10^{-10} – 3{,}7 \cdot 10^{-7}$). Активность радона ($^{222}Rn$) варьирует от 1 до 43764 Бк/дм^3. $^{232}Th/^{238}U$ отношение изменяется от $2{,}63 \cdot 10^{-5}$ до 2,96. Природа радиоактивности изученных вод в основном связана с ураном, поскольку воды характеризуются окислительными параметрами геохимической среды. Максимальные концентрации урана, тория и радона отмечаются в водных ореолах рассеяния Пригородного месторождения урана. В Скалинском проявлении радоновых вод установлены максимальные концентрации тория (до $2{,}16 \cdot 10^{-3}$), что связано с проявлением ториевой минерализации во вмещающих породах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025, РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках грантов № 19-45-540004, № 20-45-543004 и Государственного Задания РФ «Наука» в рамках проекта № FSWW-0022-2020.

Литература

1. Бабин Г. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист №-44 – Новосибирск. Объяснительная записка / А. И. Черных, А. Г. Головина, С. В. Жигалов, С. С. Долгушин, Е. В. Ветров, Т. В. Кораблева, Н. А. Бодина, Н. А. Светлова, Г. С. Федосеев, А. П. Хилько, В. А. Епифанов, Ю. И. Лоскутов, И. Ю. Лоскутов, М. В. Михаревич, Е. А. Пихутин. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 392 с.
2. Вараксин Ю. Н. Геологическое строение и полезные ископаемые Западной Сибири. Том II. Полезные ископаемые. / Свиридов В. Г., Росляков Н. А., Афанасьев А. Т., Вавилихин Г. А., Васильев И. П., Виниченко В. И., Леонов А. Н., Марус А. И., Михантьева Л. С., Нестеренко Г. В., Самсонов Г. Л., Сердюк З. Я. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1998. – 254 с.
3. Вериго Е. К. Заельцовское месторождение радоновых вод (Новосибирское Приобье) / Быкова В. В., Гусев В. К. // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Западной Сибири, 1979. – Вып. 14. – С. 47–51.
4. Вернадский В. И. История минералов земной коры. История природных вод. – Л.: Госхимтехиздат, 1933. – Т. II. – Часть 1. – Вып. 1. – 202 с.
5. Гусев В. К. Радоновые воды Колывань-Томской складчатой зоны, их использование и охрана / Вериго Е. К. // Изменение природных условий под влиянием деятельности человека, 1984. – С. 99–107.
6. Корнеева Т. В., Формы миграции химических элементов в радоновых водах месторождения «Горводолечебница» (г. Новосибирск) / Новиков Д. А.// Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 2020. – № 17. – С. 287–291.
7. Новиков Д. А. Гидрогеология и гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) / А. Ф. Сухорукова, Т. В. Корнеева // Геодинамика и тектонофизика, 2018. – Т. 9. – № 4. – С. 1255–1274.
8. Новиков Д. А. Гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод / А. С. Деркачев, А. Ф. Сухорукова // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2019. – Т. 2. – № 1. – С. 125–132.
9. Новиков Д. А. Радионуклиды в природных водах Новосибирской городской агломерации / Дульцев Ф. Ф., Сухорукова А. Ф., Максимова А. А., Черных А. В., Деркачев А. С.// Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием. – Улан-Удэ, 2020. – С. 134–138.
10. Новиков Д. А. Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадоновых вод «Инские источники» (юг Западной Сибири) / Копылова Ю. Г., Вакуленко Л. Г., Сухорукова А. Ф., Пыряев А. Н., Максимова А. А., Дульцев Ф. Ф., Черных А. В.// Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 135–145.
11. Новиков Д. А. Гидрогеология и гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) / Сухорукова А. Ф., Корнеева Т. В. // Геодинамика и тектонофизика, 2018. – Т. 9. – № 4. – С. 1255–1274.
12. Новиков Д. А. Гидрогеология и гидрогеохимия месторождения радоновых вод «Каменское» (г. Новосибирск) / Сухорукова А. Ф., Корнеева Т. В., Каменова-Тоцева Р. М., Максимова А. А., Деркачев А. С., Дульцев Ф. Ф., Черных А. В. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 192–208.
13. Посохов Е. В. Минеральные воды (лечебные, промышленные, энергетические) / Толстихин Н. И. – Ленинград: Изд-во Недра, 1977. – 240 с.
14. Росляков Н. А. Естественные радионуклиды в геологической среде Новосибирской области / Жмодик С. М., Пахомов В. Г. // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы IV Международной конференции. – Томск, 2013. – С. 461–464.
15. Ферсман А. Е. Избранные труды. – Москва: Изд-во Академии наук СССР, 1959. – Т. 5. – 858 с.

16. Novikov D. A. Microelements in radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia) / T. V. Korneeva // Journal of Physics: Conference Series, 2019. – V. 1172. – № 012096.
17. Novikov D. A. Role of water-rock interactions in the formation of the composition of radon waters of the Zaeltsovsky field (the southern part of West Siberia) / Dultsev F. F., Chernykh A. V. // Journal of Physics: Conference Series, 2020. – V. 1451. – Article 012007.
18. Novikov D. A. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky-Mochishche zone of Novosibirsk, Russia / F. F. Dultsev, R. M. Kamenova-Totzeva, T. V. Korneeva // Environmental Earth Sciences, 2021. – V. 80. – № 216.

ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ УРАНА И ТОРИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ АРКТИЧЕСКОГО СЕКТОРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Д. А. Новиков[1,2], Ю. Г. Копылова[3], Ф. Ф. Дульцев[1], Л. Г. Вакуленко[1,2], А. А. Максимова[1], А. А. Хващевская[3], П. А. Ян[1,2], А. В. Черных[1]

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН
Новосибирск, Россия, NovikovDA@ipgg.sbras.ru
[2]Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия, NovikovDA@ipgg.sbras.ru
[3]Томский политехнический университет
Томск, Россия, unpc_voda@mail.ru

THE FIRST DATA ON THE URANIUM AND THORIUM DISTRIBUTION IN THE GROUNDWATERS OF THE OIL-GAS-BEARING DEPOSITS IN THE ARCTIC PART OF WEST SIBERIA

D. A. Novikov[1,2], Yu. G. Kopylova[3], F. F. Dultsev[1], L. G. Valulenko[1,2], A. A. Maksimova[1], A. A. Khvashchevskaya[3], P. A. Yan[1,2], A. V. Chernykh[1]

[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS
Novosibirsk, Russia, NovikovDA@ipgg.sbras.ru
[2]Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russia
[3]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, unpc_voda@mail.ru

The results studying the distribution of uranium and thorium in groundwaters of the oil-gas-bearing deposits of the Arctic regions of West Siberia are presented for the first data. The studied water is very diverse in chemical composition and TDS (from ultrafresh to weak brines). The concentration of radionuclides in waters are (mg/l): ^{238}U ($4.90 \cdot 10^{-7} – 5.14 \cdot 10^{-3}$), ^{232}Th ($1.90 \cdot 10^{-6} – 8.93 \cdot 10^{-3}$). The ratio of $^{232}Th/^{238}U$ is 0.07–93.1 and the maximum value is reached in waters of the valanginian aquifer. For waterproof horizons, the ratio of $^{232}Th/^{238}U$ is 1.82–5.23 with an average value of 3.56. The rocks of Bazhenov Formation, the nature of the radioactivity of which is associated with uranium, is characterized by the lowest values of $^{232}Th/^{238}U$ = 0.07–1.71. The formation of the radionuclide composition of waters with high $^{232}Th/^{238}U$ ratios occurred in a reducing environment with the wide development of elisional processes, where thorium is capable of migration.

Введение

Накопление фактических данных по гидрогеологии и гидрогеохимии нефтегазоносных отложений арктического сектора Западной Сибири ведется с начала геологоразведочных работ на нефть и газ. Результаты этих исследований приведены в работах О. В. Равдоникас, А. Э. Конторовича, Б. П. Ставицкого, Ю. Г. Зимина, Н. М. Кругликова, В. В. Нелюбина, О. Н. Яковлева, Г. А. Ивановой, Г. Д. Гинсбурга, И. Н. Ушатинского, В. М. Матусевича, А. А. Карцева, А. Р. Курчикова, С. Л. Шварцева, Д. А. Новикова и многих других исследователей начиная с 1960-х годов [2–15, 17].

Несмотря на 70-летний период изучения подземных вод нефтегазоносных отложений Западной Сибири до настоящего времени в научной литературе отсутствуют сведения об их радионуклидном

составе. Это объяснялось довольно низкими концентрациями урана и тория в водах нефтегазоносных отложений. Поэтому до появления в арсенале гидрогеохимиков метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП) содержания радионуклидов в результатах химико-аналитических исследований этих вод не фиксировались.

Поведение урана и тория в природных водах различного изотопно-геохимического облика определяется в первую очередь параметрами среды, в нашем случае восстановительными. В. И. Вернадский считал, что торий не переходит в раствор и в земных условиях находится в рассеянном состоянии. «Торий принадлежит к числу тех химических элементов, которые стоят вне геохимии воды, вернее водных растворов». При этом, отмечая постоянство Th/U отношения в продуктах магматических процессов, он подчеркивает высокую степень подвижности урана в водных растворах и инертность тория, концентрации которого в земных условиях должны быть ничтожными [1]. Торий как элемент – гидролизат не склонен накапливаться в водах под воздействием экзогенных процессов разрушения алюмосиликатных пород, а стремится к образованию гидроокислов и осаждению с вторичной фазой в условиях окислительной среды.

В настоящей работе приводятся первые данные по распределению урана и тория в подземных водах юрско-меловых нефтегазоносных отложений арктического сектора Западной Сибири. Учитывая, что эти резервуары в изучаемом районе характеризуются широким проявлением повышенных и аномально-высоких пластовых давлений (АВПД), природа которых связана с функционированием элизионных водонапорных систем [7, 11, 15], нами также было рассмотрено их распределение в основных флюидоупорах, которые являлись источником первых.

Материалы и методы

В основу настоящих исследований положены материалы изучения 283 проб подземных вод, отобранных в резервуарах широкого стратиграфического диапазона (от сеномана до верхней части палеозойского фундамента) на 36 месторождениях нефти и газа арктического сектора Западной Сибири. Гидрогеохимическое опробование этих объектов проводилось во время экспедиционных работ 2017–2021 гг. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ (аналитики О. В. Чеботарева, Н. В. Бублий, А. С. Погуца, В. В. Куровская, К. Б. Кривцова, Л. А. Ракул, Э. С. Шведская). Горные породы были изучены методом ИСП МС в ЦКП ИГМ СО РАН.

Результаты и их обсуждение

В пределах изученных геологических структур выявлены подземные воды разного химического состава. Во всех водоносных комплексах доминируют воды (по С. А. Щукареву) Cl Na, Cl–HCO_3 Na и HCO_3–Cl Na типов с величиной общей минерализации от 2–5 г/дм^3 в прибортовых районах изучаемого региона до 63,3 г/дм^3 в центральных [15, 17]. Наиболее минерализованные воды приурочены к верхнеюрскому водоносному комплексу. Конденсатогенные воды, имеющие единую историю с залежами углеводородов имеют местами более низкую минерализацию, вплоть до ультрапресных [8–9, 17]. Каждый из химических типов имеет свои особенности в распределении основных солеобразующих макро- и микрокомпонентов, концентрации которых напрямую зависят от величины их минерализации. По мере ее роста происходит закономерное увеличение содержаний хлорида, натрия, магния, кальция, калия, микрокомпонентов: брома, иода, бора, аммония и стронция. При минерализации вод 15–20 г/дм^3 и более в них происходит снижение содержания гидрокарбонат – иона. Концентрации сульфат – иона в среднем не превышают 20–60 мг/л^3, что связано с широко известным процессом его восстановления до сероводорода еще на иловой стадии.

В распределении урана и тория такой закономерности не наблюдается. Содержания природных радионуклидов в подземных водах варьируют в широком интервале у ^{238}U от $4{,}90 \cdot 10^{-7}$ до $5{,}14 \cdot 10^{-3}$ мг/дм^3 и у ^{232}Th от $1{,}90 \cdot 10^{-6}$ до $8{,}93 \cdot 10^{-3}$ мг/дм^3. Установлено, что в большинстве проб концентрации урана и тория не превышают $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ мг/дм^3, при превышении последнего в большинстве изученных объектов при изменении ^{232}Th/^{238}U отношения от 0,07 до 93,1, при среднем 5,6. (рис. 1).

Алеврито-глинистые отложения изученной части разреза (байос-альб), формирующие флюидоупоры в составе резервуаров арктического сектора Западной Сибири, представлены в основном сероцветными аргиллитами: темно-серыми, до черных, в различной степени углистых, реже серыми. Глинистые и кремнисто-глинистые породы верхнеюрского баженовского горизонта буровато-черные. Аргиллиты тонкоотмученные массивные и в различной степени алевритистые, алевритовые, участками в тонком переслаивании с алевролитами.

В составе глинистого вещества средне-верхнеюрских (добаженовских) пород, как правило, в разной степени преобладает диоктаэдрическая слюда мусковитового типа 2М1 с небольшой примесью смешанослойного иллит/смектита, затем следует хлорит, периодически появляется каолинит низкой и средней степени структурной упорядоченности. Для кероген-карбонатно-глинисто-кремнистой баженовской свиты изучаемого района Западной Сибири характерны низкая карбонатность высокая глини-

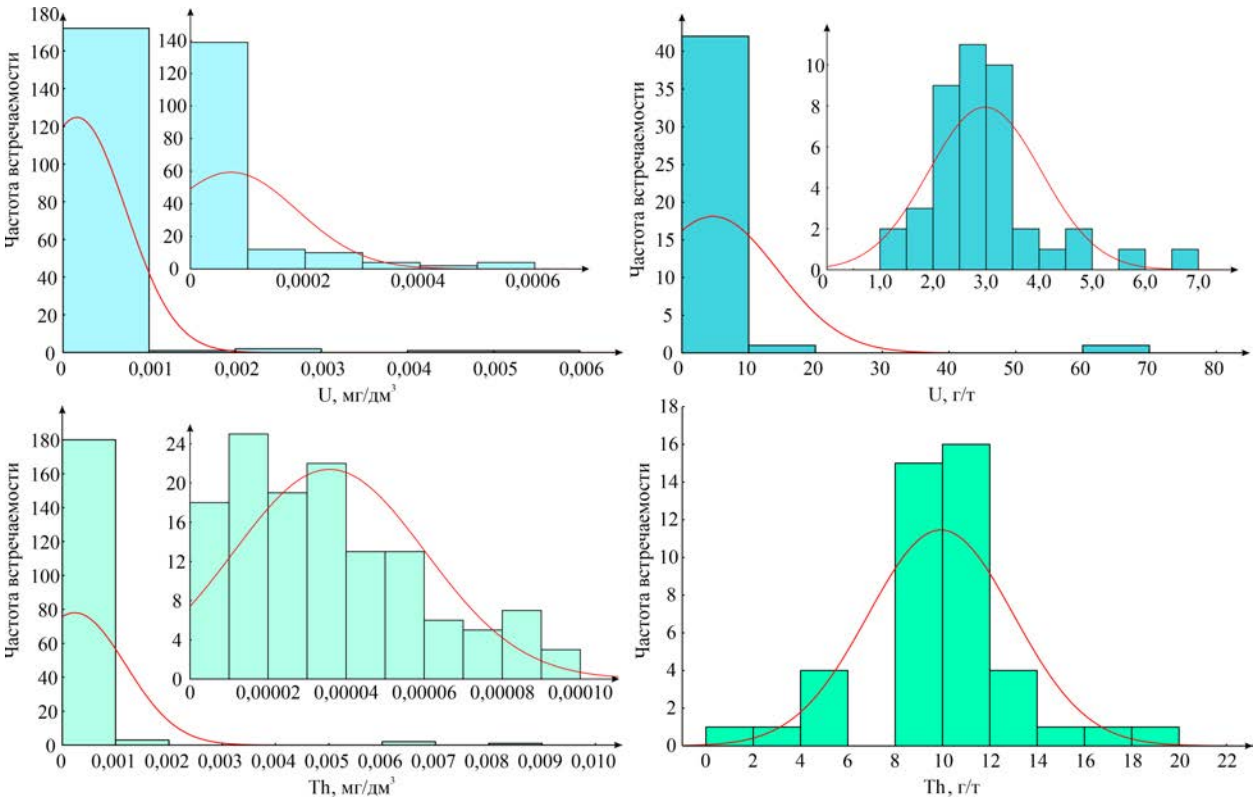


Рис. 1. Распределение ^{238}U и ^{232}Th (б) в подземных водах и водоупорных породах нефтегазоносных отложений юры и мела арктического сектора Западной Сибири

стость, пониженное содержание керогена [16]. Разрезы сложены пачками микститов кремнисто-глинистых, глинисто-кремнистых с прослоями аргиллитов алевритистых и силицитов. В составе глинистой части пород существенно преобладает диоктаэдрическая слюда, в подчиненном количестве отмечается хлорит, в разной степени проявлен смешанослойный иллит/смектит, иногда разупорядоченный смектит.

Состав глинистого вещества нижнемеловых отложений отличается от юрского преобладанием хлорита. Соотношение диоктаэдрической слюды и каолинита меняется вверх по разрезу – содержание первой уменьшается, а второго растет. Постоянно отмечается небольшая примесь смешанослойных образований и монтмориллонита.

Природа радиоактивности большинства изученных флюидоупоров юрско-мелового разреза также связана с торием, за исключением баженовской свиты, где доминирует уран. Концентрации ^{238}U находятся в пределах 1,42–66,51 г/т и ^{232}Th – 1,95–19,13 г/т (см. рис. 1). Средние концентрации у урана составляют 4,60 г/т и 9,88 у тория соответственно. $^{232}Th/^{238}U$ отношение изменяется от 1,82 до 5,23, при среднем значении 3,56.

Анализ полученных данных по распределению урана и тория совместно с результатами гидродинамических исследований нефтегазоносных отложений в регионе впервые позволил выявить общие черты вертикальной радиохимической зональности системы вода – порода (рис. 2). Скорость уплотнения пород относительно высока при глубине их захоронения до 1000 м и замедляется с ее ростом. Это явление отмечено во многих нефтегазоносных бассейнах мира, а в изучаемом регионе повышенные и аномально высокие, т.е. сверхгидростатические пластовые давления в водонапорной системе мезозоя наблюдаются, начиная с низов апт-альб-сеноманского комплекса и доминируя в юрских [7]. В пост-триасовой части разреза сверху вниз отчетливо выделяются две гидродинамические зоны: гидростатических давлений и повышенных, переходящих в АВПД. К первой приурочены большинство водоносных горизонтов апт-альб-сеноманского водоносного комплекса. Ко второй – горизонты неокома и юры, причем в неокомских наблюдается переход от повышенных давлений к АВПД. В юрских комплексах в изучаемом регионе доминируют повышенные давления и АВПД, которые снижаются до гидростатических по мере приближения к периферии бассейна.

Таким образом, по мере развития осадочно-породного бассейна, уплотняющиеся флюидоупоры были источником элизионных вод и в условиях восстановительной геохимической среды принимали активное участие в формировании радионуклидного состава подземных вод и обогащения их в большей мере торием, чем ураном (рис. 2 а, б). Вариация $^{232}Th/^{238}U$ отношения в системе вода – порода (рис. 2в) в зависимости от возраста вмещающих пород выяви-

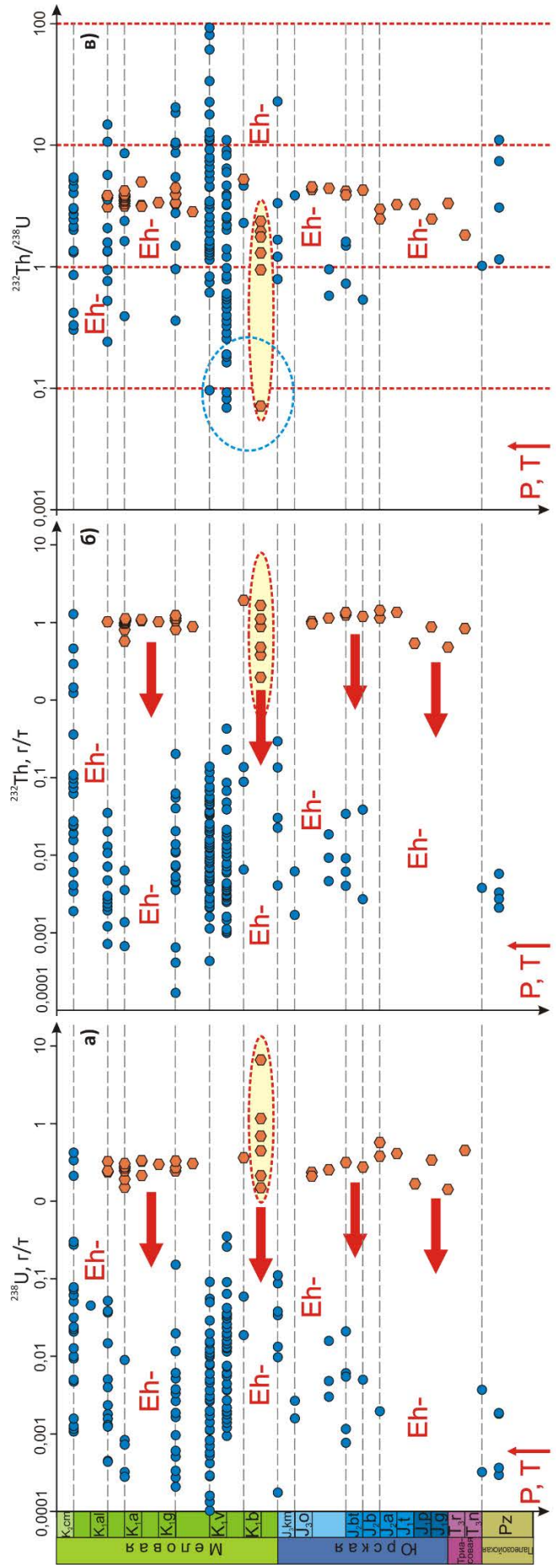


Рис. 2. Распределение ^{238}U и ^{232}Th (б) в подземных водах и водоупорных породах нефтегазоносных отложений юры и мела арктического сектора Западной Сибири

Распределение урана и тория в: 1 – подземных водах, 2 – водоупорных толщах; 3 – миграция радионуклидов в восстановительной среде из водоупорных пород в условиях элизионного режима при росте пластовых температур и давлений; 4 – поле значений баженовской свиты; 5 – поле влияния баженовской свиты на воды с пониженным ^{232}Th/^{238}U отношением.

ла группу точек (синий овал) в водоносных горизонтах берриаса-валанжина с величиной близкой к 0,1. Этот факт мы можем объяснить восходящей разгрузкой элизионных вод, отжатых из баженовской свиты (желтый овал), по зонам тектонических нарушений.

Заключение

Резюмируя вышесказанное, отметим, что изученные воды весьма разнообразны по химическому составу и величине общей минерализации (от ультрапресных до слабых рассолов). Содержания природных радионуклидов варьируют в широком интервале (мг/дм^3): ^{238}U ($4{,}90 \cdot 10^{-7} – 5{,}14 \cdot 10^{-3}$), ^{232}Th ($1{,}90 \cdot 10^{-6} – 8{,}93 \cdot 10^{-3}$). ^{232}Th/^{238}U отношение изменяется от 0,07 до 93,1 и его максимальные значения характеризуют воды валанжинских водоносных горизонтов. ^{232}Th/^{238}U отношение во флюидоупорах находится в довольно узком диапазоне и составляет 1,82–5,23, при среднем значении 3,56. На этом фоне самыми низкими отношениями ^{232}Th/^{238}U = 0,07–1,71 отличаются породы баженовской свиты, природа радиоактивности которой связана с ураном. Формирование радионуклидного состава подземных вод нефтегазоносных отложений арктического сектора Западно-Сибирского бассейна с высокими ^{232}Th/^{238}U отношениями шло в восстановительной среде в условиях элизионных водонапорных систем с высокими пластовыми температурами и давлениями, вплоть до аномально высоких с Ка до 2,0 и более. Следует отметить, что настоящие исследования по фракционированию химических элементов в системе вода – горная порода будут продолжены в направлении скрупулезного изучения водовмещающих отложений.

Исследования проводились при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025, РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-70074 «Ресурсы Арктики», РФФИ и Правительства Ямало-Ненецкого автономного округа в рамках научного проекта № 19-45-890005 и Государственного Задания РФ «Наука» в рамках проекта № FSWW-0022-2020.

Литература

1. Вернадский В. И. Очерки геохимии. – Л.: Горно-геолого-нефтяное изд-во, 1934. – 380 с.
2. Гинсбург Г. Д., Иванова Г. А. Основные черты геохимии подземных вод в юрско-меловой толще юго-западной части Енисей-Хатангской нефтегазоносной области // Енисей-Хатангская нефтегазоносная область. – Л.: НИИГА, 1974. – С. 71–85.
3. Конторович А. Э., Нестеров И. И., Салманов Ф. К., Сурков В. С., Трофимук А. А., Эрвье Ю. Г. Геология нефти и газа Западной Сибири. – М.: Недра, 1975. – 680 с.
4. Кох А. А., Новиков Д. А. Гидродинамические условия и вертикальная гидрогеохимическая зональность подземных вод в западной части Хатангского артезианского бассейна // Водные ресурсы, 2014. – Т. 41. – № 4. – С. 375–386.
5. Кругликов Н. М. Гидрогеология северо-западного борта Западно-Сибирского артезианского бассейна // Тр. ВНИГРИ. – Л.: Недра, 1964. – Вып. 238. – 166 с.
6. Кругликов Н. М., Нелюбин В. В., Яковлев О. Н. Гидрогеология Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна и особенности формирования залежей углеводородов. – Л.: Недра, 1985. – 279 с.
7. Новиков Д. А. Роль элизионного водообмена в формировании гидродинамического поля Ямало-Карской депрессии // Литология и полезные ископаемые, 2019. – № 3. – С. 248–261.
8. Новиков Д. А., Борисов Е. В. Прогноз нефтегазоносности юрских резервуаров зоны сочленения Енисей-Хатангского и Западно-Сибирского бассейнов // Геология и геофизика, 2021. – Т. 62. – № 2. – С. 216–237.
9. Новиков Д. А., Вакуленко Л. Г., Ян П. А. Особенности латеральной гидрогеохимической и аутигенно-минералогической зональности оксфордского регионального резервуара Надым-Тазовского междуречья // Геология и геофизика, 2019. – Т. 60. – № 6. – С. 843–859.
10. Новиков Д. А., Дульцев Ф. Ф., Черных А. В., Хилько В. А., Юрчик И. И., Сухорукова А. Ф. Гидрогеохимия доюрских комплексов Западной Сибири // Геология и геофизика, 2020. – Т. 61. – № 11. – С. 1561–1576.
11. Новиков Д. А., Лепокуров А. В. Гидрогеологические условия нефтегазоносных отложений на структурах южной части Ямало-Карской депрессии // Геология нефти и газа, 2005. – № 5. – С. 24–33.
12. Равдоникас О. В. Основные итоги гидрогеологических исследований нефтеносных районов севера Западной Сибири // Труды НИИГА, 1962. – Вып. 129. – С. 194–201.
13. Ставицкий Б. П., Курчиков А. Р., Конторович А. Э., Плавник А. Г. Гидрохимическая зональность юрских и меловых отложений Западно-Сибирского бассейна // Геология и геофизика, 2004. – Т. 45. – № 744. – С. 826–832.
14. Ушатинский И. Н., Матусевич В. М. Основные черты геохимии микроэлементов в нефтегазоносных отложениях, подземных водах и нефтях Западной Сибири // Тр. ЗапСибНИГНИ, 1970. – Вып. 35. – С. 215–253.
15. Шварцев С. Л., Новиков Д. А. Природа вертикальной гидрогеохимической зональности нефтега-

зоносных отложений (на примере Надым-Тазовского междуречья, Западная Сибирь) // Геология и геофизика, 2004. – Т. 45. – № 8. – С. 1008–1020.
16. Эдер В. Г. Литология и условия образования баженовской свиты Западной Сибири. Автореферат на соискание ученой степени д.г.-м.н. – Москва, 2021. – 46 с.
17. Novikov D. A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins // Petroleum Exploration and Development, 2017. – V. 44. – № 5. – P. 780–788.

ТОРИЙ-УРАНОВАЯ ТИПИЗАЦИЯ РАДОНОВЫХ ВОД ЮГА СИБИРИ

Д. А. Новиков[1,2], Ю. Г. Копылова[3], А. А. Хващевская[3], А. А. Максимова[1], А. С. Деркачев[1], Ф. Ф. Дульцев[1], А. В. Черных[1]

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН
Новосибирск, Россия, NovikovDA@ipgg.sbras.ru
[2]Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия, NovikovDA@ipgg.sbras.ru
[3]Томский политехнический университет
Томск, Россия, unpc_voda@mail.ru

THORIUM-URANIUM TYPIFICATION OF RADON-RICH WATERS IN THE SOUTH OF WEST SIBERIA

D. A. Novikov[1,2], Yu. G. Kopylova[3], A. A. Khvaschevskaya[3], A. A. Maksimova[1], A. S. Derkachev[1], F. F. Dultsev[1], A. V. Chernykh[1]

[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS
Novosibirsk, Russia, NovikovDA@ipgg.sbras.ru
[2]Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russia
[3]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, unpc_voda@mail.ru

Thorium-uranium typification has been proposed for the first time for 22 deposits and occurrences of radon-rich waters in the southern part of West Siberia. The studied waters are extremely diverse in gas and chemical composition, TDS, and geochemical parameters of the medium. The concentrations of natural radionuclides are (mg/dm^3): ^{238}U ($3.68 \cdot 10^{-7} – 1.40$), ^{232}Th ($4.04 \cdot 10^{-7} – 2.16 \cdot 10^{-3}$). The activity of dissolved radon (^{222}Rn) varies from 4 to 2257 Bq/dm^3. The ^{232}Th/^{238}U ratio varies from $2.63 \cdot 10^{-5}$ to 26, and its maximal values were detected in ultrafresh, thermal, alkaline waters with the reductive geochemical medium in which thorium possesses increased migration capacity. Quite the contrary, uranium migrates in the oxidative geochemical setting.

Введение

Одним из важнейших ресурсов для успешного развития любого региона являются природные воды, используемые в питьевых целях и бальнеолечении. К сожалению, в настоящее время среди огромного количества месторождений и проявлений минеральных вод Сибири современными методами изучены лишь несколько десятков. Для их полноценного использования необходимо иметь актуальное представление об их составе, в первую очередь это касается радионуклидов (^{238}U, ^{232}Th, ^{226}Ra и ^{222}Rn).

В настоящей работе сделана первая попытка торий-урановой типизации 22 месторождений и проявлений радоновых вод южных районов Сибири (рис. 1а). Следует отметить, что по некоторым из них гидрогеохимические данные приводятся впервые. Это связано с тем, что они были открыты авторами на территории Новосибирской городской агломерации и в ее окрестностях в течение полевых сезонов 2019–2020 гг. – Инские источники, Седова заимка, Новобибеевское и Зырянское. Радоновые воды Сибири изучаются на протяжении многих лет и результаты их исследований приведены в работах В. К. Гусева, Е. К. Вериго, В. А. Елисеева, Ю. И. Кустова, Л. В. Заманы, Ю. Г. Копыловой, А. М. Плюснина, Г. М. Шпейзера, А. И. Оргильянова, А. А. Булатова, Д. А. Новикова и других [2, 4–9, 11–19, 22–23].

Поведение урана и тория в природных водах различного изотопно-геохимического облика определяется в первую очередь параметрами среды. В. И. Вернадский считал, что торий не переходит в раствор и в земных условиях находится в рассеянном состоянии. «Торий принадлежит к числу тех химиче-

ских элементов, которые стоят вне геохимии воды, вернее водных растворов». При этом, отмечая постоянство Th/U отношения в продуктах магматических процессов, он подчеркивает высокую степень подвижности урана в водных растворах и инертность тория, концентрации которого в земных условиях должны быть ничтожными [3]. Такое разделение урана и тория обусловлено, прежде всего, миграционной способностью их соединений в условиях земной коры, определяемой внутренними свойствами этих элементов, благодаря чему в водах зоны гипергенеза чаще всего наблюдается преобладание концентраций урана над концентрациями тория. При этом информация о их соотношениях в горных породах и водах, полученная различными авторами [1], позволяет считать, что в зоне гипергенеза происходит накопление урана в водах, а тория – в донных осадках. Торий как элемент – гидролизат не склонен накапливаться в водах под воздействием экзогенных процессов разрушения алюмосиликатных пород, а стремится к образованию гидроокислов и осаждению с вторичной фазой в условиях окислительной среды [10].

Материалы и методы

В настоящей работе представлены актуальные данные по 22 месторождениям и проявлениям радоновых вод южных районов Сибири. Гидрогеохимическое опробование этих объектов (310 проб) проводилось во время полевых работ 2007–2020 гг. Гидрогеохимическая характеристика источников Даштыг-Хем, Шандал-Ой и Верхнего Кадыр-Ос приводится по данным А. И. Оргильянова и др. [18], а источников долины реки Кыра по данным Л. В. Заманы и Ш. А. Аскарова [6]. Непосредственно на объектах было выполнено определение pH, Eh, тем-

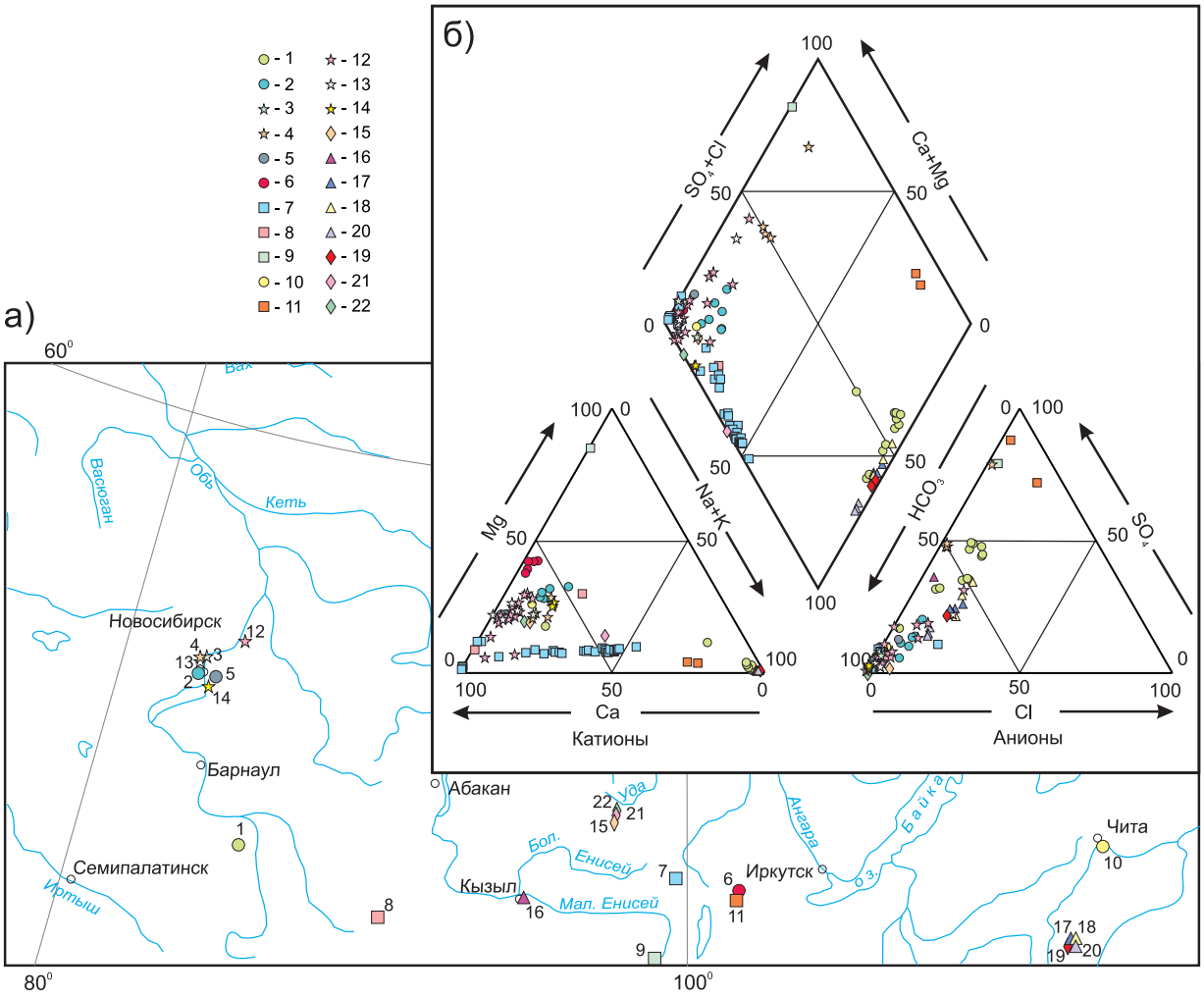


Рис. 1. Местоположение изученных месторождений и проявлений радоновых вод на юге Сибири (а), диаграмма Пайпера состава радоновых вод (б)

Месторождения и проявления: 1 – Белокурихинское, 2 – Станиславское, 3 – Седова заимка, 4 – Скалинское, 5 – Инские источники, 6 – Шумакские источники, 7 – Чойган, 8 – Шивелигское, 9 – Тарыс, 10 – Молоковка, 11 – Нилова Пустынь, 12 – Новобибеевское, 13 – Колыванское, 14 – Зырянское, 15 – Верхний Кадыр-Ос, 16 – Уш-Белдир, 17 – Улурийский источник (верхние), 18 – Улурийский источник (нижние), 19 – Кыринский источник, 20 – Былиринский источник, 21 – Даштыг-Хем, 22 – Шандал-Ой.

пературы, содержания растворенного O_2, HCO_3^- с помощью полевой гидрогеохимической лаборатории. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Выделение однородных геохимических совокупностей проводилось с помощью коэффициентов (Ca/Si, Mg/Si, Na/Si, Si/Na, Ca/Na, Ca/Mg, rNa/rCl и SO4/Cl). Отношения Ca/Na, Ca/Mg, Ca/Si, Mg/Si, Na/Si использованы для оценки особенностей обогащения вод за счет процессов гидролиза алюмосиликатов и конгруэнтного растворения карбонатов; SO_4^{2-}/Cl^- >> 1 и rNa^+/rCl^- >> 1 – гидролиза алюмосиликатов и окисления сульфидных минералов; пропорциональное увеличение значений SO_4^{2-}/Cl^- = 1, rNa^+/rCl^- ≥ 1, Ca/Na > 0 – испарительного концентрирования.

Результаты и их обсуждение

Радоновые воды изученных объектов были разделены на три группы по величине Eh согласно классификации А. В. Щербакова [21]: 1) окислительной обстановки (Eh > +100), 2) переходной (+100 > Eh > 0) и 3) восстановительной (Eh < 0). Ввиду широкого разнообразия вод по химическому составу (см. рис. 1б) некоторые из изученных объектов относятся сразу к нескольким группам, например, природный комплекс Чойган, проявления Скалинское, Новобибеевское и Седова Заимка (рис. 2а).

Первая группа включает радоновые воды Станиславского месторождения, природного комплекса Чойган, проявлений Скалинское, Колыванское, Инские источники, Новобибеевское и Зырянское. Они в основном SO_4–HCO_3 Na–Mg–Ca, HCO_3 Mg–Ca и HCO_3 Na–Ca состава с величиной общей минерализации, варьирующей от 385 до 2647 мг/дм^3 и содержанием кремния 0,52–21,21 мг/дм^3. Геохимическая обстановка характеризуется Eh от +107,8 до +250,0 мВ, широкой вариацией pH от слабокислых до слабощелочных (5,9–8,3). Величины средних геохимических коэффициентов для этой группы равны для Ca/Na 16,53; Ca/Mg 15,87; Ca/Si 26,62; Mg/Si 2,33; Na/Si 5,98; Si/Na 0,54; rNa/rCl 19,14 и SO_4/Cl 5,71. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм^3): ^{238}U от 1,61 • 10^{-4} до 1,21 и ^{232}Th от 1,86 • 10^{-7} до 2,16 • 10^{-3}. ^{232}Th/^{238}U отношение в радоновых водах варьирует в интервале от 4,20 • 10^{-5} до 7,39 • 10^{-2}, при среднем 3,83 • 10^{-3}. Активность ^{222}Rn изменяется в широком диапазоне от 2 до 655 Бк/дм^3.

Во вторую группу входят ряд источников природного комплекса Чойган, проявления Новобибеевское, Скалинское и Седова Заимка. Они в основном HCO_3 Na–Ca и HCO_3 Mg–Ca состава с величиной общей минерализации, варьирующей от 364 до 2712 мг/дм^3 и концентрацией кремния 12,04–25,64 мг/дм^3. Геохимическая обстановка характеризуется переходными Eh от +10,0 мВ до +84,6 мВ, pH от слабокислых до слабощелочных (6,2–7,6). Значения средних геохимических коэффициентов по сравнению с первой группой возрастают у Ca/Na 26,36; Ca/Mg 37,88; Na/Si 11,33; rNa/rCl 22,77 и снижаются у Ca/Si 21,07; Mg/Si 1,12; Si/Na 0,17; SO4/Cl 4,82. Концентрации (мг/дм^3): ^{238}U изменяются в диапазоне 1,04 • 10^{-4} – 1,40, а ^{232}Th в интервале 4,04 • 10^{-7} – 2,96 • 10^{-4}. ^{232}Th/^{238}U отношение варьирует от 2,63 • 10^{-5} до 0,20 при среднем 0,01. Активность ^{222}Rn в радоновых водах составляет 6,5–947 Бк/дм^3.

Третья разновидность объединяет в себе радоновые воды природных комплексов Тарыс, Чойган и Уш-Белдир; проявления Новобибеевское и Седова Заимка; источники Улурийские верхние и нижние, Кыринские, Былиринские. Они преимущественно HCO_3 Na–Ca, HCO_3 Mg–Ca и Cl–SO_4–HCO_3 Na состава с величиной общей минерализации от 195 до 2525 мг/дм^3 и содержанием кремния 19,05–32,90 мг/дм^3. Геохимическая обстановка характеризуется восстановительными условиями с Eh от –482,0 до –24,0 мВ, слабокислыми и щелочными pH (6,3–10). Значения средних геохимических коэффициентов по сравнению с первой группой возрастают у Ca/Mg 23,14; Na/Si 9,96; rNa/rCl 24,16 и снижаются у Ca/Na 4,73; Ca/Si 19,32; Mg/Si 1,77; SO4/Cl 2,87, а сопоставимые величины у Si/Na 0,54. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм^3): ^{238}U от 3,68 • 10^{-7} до 8,83 • 10^{-4} и ^{232}Th от 1,40 • 10^{-6} до 8,97 • 10^{-5}. ^{232}Th/^{238}U отношение в радоновых водах варьирует в диапазоне от 0,0022 до 26, при среднем 2,42. Активность ^{222}Rn изменяется в широком интервале от 16 до 655 Бк/дм^3.

Ранее, отмечалась достаточно сложная картина соотношений радиоактивных элементов в водах [10]. Это разнообразие связано с различным характером поведения этих элементов в условиях зоны гипергенеза – малую способность тория к миграции в водах окислительной обстановки, благоприятной для миграции и накопления урана [20]. Концентрации урана в изученных радоновых водах изменяются в широком диапазоне от 3,68 • 10^{-7} до 1,4 мг/дм^3. Максимальные содержания характеризуют источник Даштыг-Хем (до 1,02 мг/дм^3) и Скалинское проявление (0,93–1,4 мг/дм^3). Наибольший интерес представляет наименее изученный торий, концентрации которого изменяются в диапазоне от 1,86 • 10^{-7} до 2,16 • 10^{-3} мг/дм^3, при среднем значении 4,62 • 10^{-5} мг/дм^3. На фоне в целом невысоких концентраций тория выделяются ряд объектов с максимальными значениями в пределах (мг/дм^3): Белокурихинского месторождения (до 8,57 • 10^{-4}), природного комплекса Чойган (до 3,34 • 10^{-4}) и Скалинского проявления (до 2,16 • 10^{-3}). Безусловно, такие высокие концентрации говорят о наличии редкоземельных и ториевых минералов в водовмещающих породах.

Установлено, что торий-урановое отношение в изученных радоновых водах растет с увеличением

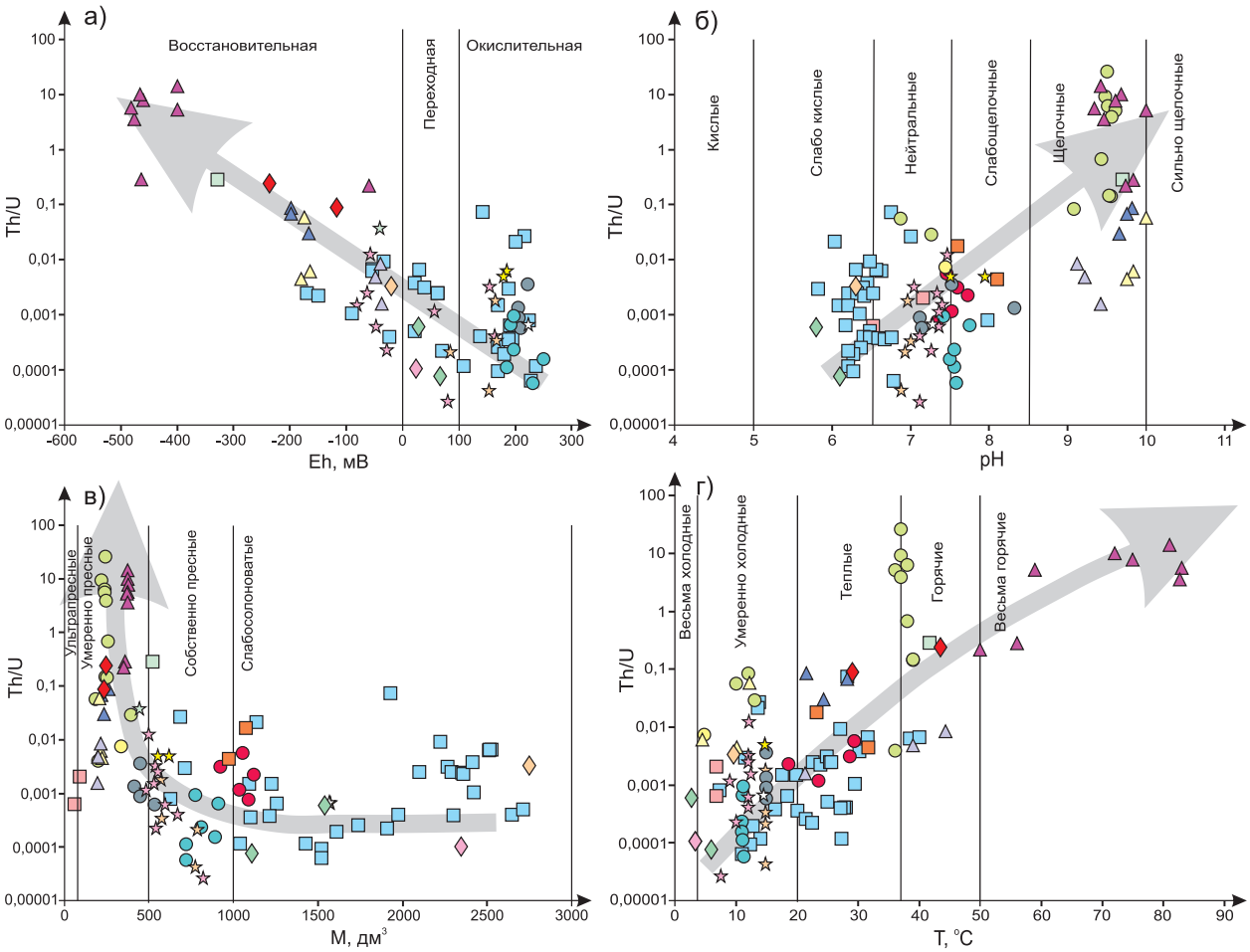


Рис. 2. Зависимость Th/U отношения в радоновых водах Сибири от геохимических параметров среды Eh, pH, величины общей минерализации и температуры

Условные обозначения см. рис. 1.

pH среды, ее температуры, а также снижением общей минерализации (рис. 2 б–г). Эти факты требуют скрупулёзных исследований.

Заключение

Резюмируя вышесказанное, отметим, что до настоящего времени минеральные воды Сибири крайне слабо изучены. Установлено, что поведение тория и урана в изученных радоновых водах в первую очередь определяется геохимическими параметрами среды. Торий мигрирует в восстановительной среде, а уран в окислительной, где первый образует гидроокислы и осаждается со вторичными минералами. Смена окислительных обстановок на восстановительные приводит к росту $^{232}Th/^{238}U$ отношения, которое изменяется от $4{,}20 \cdot 10^{-5}$ – $7{,}39 \cdot 10^{-2}$ в окислительных, составляя $2{,}63 \cdot 10^{-5}$ – 0,20 в переходных и достигает 0,0022–26 в восстановительных. Влияние пластовой температуры резервуара на миграционную способность урана и тория требует дальнейшего изучения с привлечением имеющихся данных по подземным водам глубоких горизонтов осадочных бассейнов, которые являются термальными.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025, РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках гранта № 19-45-540004 и Государственного Задания РФ «Наука» в рамках проекта № FSWW-0022-2020.

Литература

1. Арбузов С. И. Геохимия радиоактивных элементов: учебное пособие. Рихванов Л. П. / – 3-е изд., исправленное и дополненное. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 304 с.
2. Булатов А. А. Новые сведения о составе радоновых вод (Шивелигское месторождение) / Ю. Г. Копылова, Н. К. Джабарова, К. М. Рычкова, К. Д. Аракчаа, А. А. Хващевская, Н. В. Гусева, А. В. Пашагин // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов, 2013. – № 1. – С. 154–161.
3. Вернадский В. И. Очерки геохимии. – Л.: Горно-геолого-нефтяное изд-во, 1934. – 380 с.

4. Гусев В. К., Радоновые воды Колывань-Томской складчатой зоны, их использование и охрана / Е. К. Вериго // Изменение природных условий под влиянием деятельности человека. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1984. – 176 с.
5. Елисеев В. А. Радоновые воды Алтая и их использование в санаторно-курортной практике / Ю. Н. Акуленко, А. В. Пузанов // Известия Алтайского государственного университета, 2000. – № 3 (17). – С. 63–65.
6. Замана Л. В. Физико-химические характеристики азотных термальных источников бассейна реки Кыра (юго-восточное Забайкалье) / Ш. А. Аскаров // Ученые записки Забайкальского государственного гуманитарно-педагогического университета, 2011. – № 1 (36). – С. 173–178.
7. Иванова К. Ю. Особенности химического состава подземных вод родников западной Тувы / А. А. Хващевская // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов, 2015. – № 2. – С. 167–173.
8. Копылова Ю. Г. Геохимия углекислых вод природного комплекса Чойган (северо-восток Тувы) / Н. В. Гусева, К. Д. Аракчаа, А. А. Хващевская // Геология и геофизика, 2014. – Т. 55. – № 11 – С. 1635–1648.
9. Копылова Ю. Г. Химический состав вод родников природного комплекса Тарыс (Восточная Тува) / Н. В. Гусева, К. Д. Аракчаа, Ч. К. Ойдуп, К. М. Рычкова, А. А. Хващевская, М. Г. Камбалина, Е. Ю. Каричева, И. С. Мазурова // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов, 2015. – № 2. – С. 89–98.
10. Копылова Ю. Г. Уран и торий в природных водах юго-востока Алтае-Саянской области / Н. В. Гусева, К. Д. Аракчаа, А. А. Хващевская, И. С. Мазурова, О. Д. Аюнова, Ч. К. Ойдуп, К. М. Рычкова // В сборнике: Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Материалы V Международной конференции. ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Российская академия наук, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами», ФГУГП «Урангео» и др., 2016. – С. 339–345.
11. Кустов Ю. И. Подземные минеральные воды в Тункинском регионе юго-западного фланга Байкальского рифта // Отечественная геология, 2009. – № 2. – С. 53–60.
12. Кустов Ю. И. Минеральные воды центральной части азиатского материка в пределах республики Тува // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов, 2015. – № 2. – С. 139–143.
13. Минеева Л. А. Физико-химическая характеристика минеральных вод месторождений Шумак и Чойган // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле», 2016. – Т. 17. – С. 115–134.
14. Новиков Д. А. Гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод / А. С. Деркачев, А. Ф. Сухорукова // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2019. – Т. 2. – № 1. – С. 125–132.
15. Новиков Д. А. Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадоновых вод «Инские источники» (юг Западной Сибири) / Ю. Г. Копылова, Л. Г. Вакуленко, А. Ф. Сухорукова, А. Н. Пыряев, А. А. Максимова, Ф. Ф. Дульцев, А. В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 135–145.
16. Новиков Д. А. Гидрогеология и гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) / А. Ф. Сухорукова, Т. В. Корнеева // Геодинамика и тектонофизика, 2018. – Т. 9. – № 4. – С. 1255–1274.
17. Новиков Д. А. Гидрогеология и гидрогеохимия месторождения радоновых вод «Каменское» (г. Новосибирск) / А. Ф. Сухорукова, Т. В. Корнеева, Р. М. Каменова-Тоцева, А. А. Максимова, А. С. Деркачев, Ф. Ф. Дульцев, А. В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 192–208.
18. Оргильянов А. И. Минеральные воды Тоджинского района республики Тыва / К. Д. Аракчаа, И. Г. Крюкова, П. С. Бадминов, Е. А. Солдатова, А. В. Шестакова, К. М Рычкова. // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов, 2017. – №3. – С. 147–156.
19. Плюснин А. М. Гидрогеохимические особенности состава азотных терм Байкальской рифтовой зоны / Л. В. Замана, С. Л. Шварцев, О. Г. Токаренко, М. К. Чернявский // Геология и геофизика, 2013. Т. 54. – № 5. – С. 647–664.
20. Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
21. Щербаков А. В. Геохимия термальных вод. – М.: Наука, 1968. – 237 с.
22. Шпейзер Г. М. Шумакские минеральные воды / А. А. Макаров, В. А. Родионова, Л. А. Минеева // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле», 2012. – Т. 5. – № 1. – С. 293–309.
23. Novikov D. A. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky-Mochishche zone of Novosibirsk, Russia / F. F. Dultsev, R. M. Kamenova-Totzeva, T. V. Korneeva // Environmental Earth Sciences, 2021. – V. 80. – № 216.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ АНОМАЛЬНОЙ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ КРАТОНОВ

А. Д. Ножкин, Г. М. Вовна

Институт геологии и минералогии СО РАН
Новосибирск, Россия, nozhkin@igm.nsc.ru
Дальневосточный геологический институт, ДВО РАН
Владивосток, gala1367@mail.ru

GEOCHEMICAL FEATURES OF THE ANOMALOUS UPPER MANTLE OF CRATONS

A. D. Nozhkin, G. M. Vovna

Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
Novosibirsk, Russia, nozhkin@igm.nsc.ru
Far Eastern Geological Institute, FEB RAS
Vladivostok, gala1367@mail.ru

The areas of the upper mantle enriched with the radioactive elements ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th, ^{40}K are anomalous. In the crustal layer of the anomalous mantle, cratons formed in the archean correspond, which is confirmed by the isotopic system of craton rocks with high values of $^{238}U/^{204}Pb$. The radiogeochemically anomalous composition of the upper mantle is inherited by the rocks of the recycled upper crust layer. Archean and Early Proterozoic collisional granitoids and terrigenous-sedimentary complexes are significantly enriched in U and Th in comparison with their average values in these continental rocks.

Области верхней мантии, обогащенные долгоживущими радиоактивными элементами (РАЭ) ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th, ^{40}K, являются аномальными. Предполагается, что образовались они на заключительной стадии аккреции Земли в результате столкновения с ней крупных планетезималей - представителей внешней части протопланетного облака, обогащенных литофильными элементами [3, 10]. Неоднородность составов планетообразующих астероидов приведет к неравномерному распределению в будущей верхней мантии тугоплавких элементов, в том числе РАЭ и редких земель. В отношении РАЭ это подтверждается значениями величин ($^{238}U/^{204}Pb$) для каменных метеоритов, варьирующих в интервале 1–280 [1]. Неравномерность распределения элементов создает возможность образования в мантии областей, обогащенных U и Th, которые будут играть решающую роль в радиогенной генерации тепла. Областям аномальной верхней мантии в настоящее время в коровом слое соответствуют сформировавшиеся в архее кратоны [3], что подтверждается данными свинец-свинцовой изотопной системы пород кратонов с высокими величинами μ ($^{238}U/^{204}Pb$) [11]. Здесь происходило быстрое увеличение мощности первичной базальтовой коры и последующее ее подплавление под влиянием тепла более поздних плюмов с образованием расплавов среднего и кислого состава.

Ранняя сиалическая кора архейских кратонов представлена в гранит-зеленокаменных областях амфиболит-плагиогнейсовой (серые гнейсы), а в гранулит-гнейсовых метабазит-эндербитовой породными ассоциациями. Петрохимический состав пород этих ассоциаций соответствует исходным андезитам и дацитам известково-щелочной серии, которым подчинены толеитовые базальты и коматииты [4]. Величины Єnd эндербитов и серых гнейсов ранней коры имеют положительные значения, что свидетельствует о ювенильном происхождении их протолитов. В результате архейского плюмового магматизма над аномальной верхней мантией сформировались первые блоки сиалической коры (протоконтиненты, древнейшие кратоны), разделенные протоокеанами. Мантия под протоокеаном, в сравнении с аномальными областями, менее обогащена РАЭ, вследствие этого процессы корообразования происходили с запаздыванием и проявлены только в протерозое.

Существенные геохимические различия гетерогенной мантии устанавливаются под Индо-Атлантическим и Тихоокеанским сегментами Земли. Существование таких различий доказывается на основе изучения изотопных систем Sr, Pb, Nd, Hf толеитовых базальтов срединно-океанических рифтов Индийского и Тихого океанов. Индийский мантийный резервуар характеризуется более радиогенным изотопом Sr относительно Тихоокеанского, более высоким отношением $^{208}Pb/^{204}Pb$ относительно $^{206}Pb/^{204}Pb$ и менее радиогенным изотопом Nd относительно изотопа Hf [8, 12]. В работе [9] показано, что в пределах Индо-Атлантического океана выделяются все четыре изотопно-геохимических типа мантийных резервуаров – ДМ, EM1, EM2, HIMU, в то время как Тихоокеанский тип соответствует только резервуару ДМ. Под кратонами широко распространена мантия HIMU состава. Об этом свидетельствует обширное поле составов

Таблица 1. Радиоактивные элементы в раннедокембрийских гранитоидах и фанерозойских вулканогенных породах кратонов

Комплекс, массив, порода	U, г/т	Th, г/т	K, %
Раннедокембрийские гранитоиды			
Архейские натрий-калиевые гранитоиды [7]			
Граниты довитватерсрандского фундамента	10–30	40–70	3–4,5
Граниты субщелочные (провинция Барбертон (Ю. Африка))	4–12	21–53	4,3–4,7
Лейкограниты субщелочные батолита ГШИ-ОУ (блок Пилбара, Западная Австралия)	7–16	43–65	3,7–4,5
Граниты гор Овел Крик (Вайоминг, Канадский щит)	4–14	30–63	3,1–5,2
Граниты,субщелочные лейкограниты, токовский (Украинский щит)	8–16	60–110	4–5
Граниты альбит-микроклиновые, веретенинский (Курско-Воронежский массив)	4–4,5	15–20	3,9–4,1
Граниты субщелочные, китойский (Присаянье)	5–12	10–60	4,2–4,9
Граниты субщелочные, чародоканский (Алданский щит)	4–18	40–80	4,2–4,6
Раннепротерозойские коллизионные гранитоиды юго-западной окраины Сибирского кратона [7]			
Граниты биотитовые, таракский (Южно-Енисейский кряж)	2,7	29	3,9
Граниты порфировидные субщелочные	4,3	60	4,3
Гнейсограниты порфировидные, нерсинский (Присаянье)	4,8	41	4,4
Граниты порфировидные, приморский (Прибайкалье)	2,4	25,4	3,5
Граниты биотитовые, павловский (Присаянье)	3,5	24	3,9
Граниты биотитовые и двуслюдяные (Присаянье)	4,5	31	3,7
Раннепротерозойские внутриплитные гранитоиды			
Граниты порфировидные субщелочные, тельскунский (Южно-Енисейский кряж)	6,2	90	5,1
Граниты биотитовые порфировидные, подпорогский (Присаянье)	4,7	67	5,3
Раннепротерозойские гранитоиды других щитов [7]			
Граниты, кодарский (Алданский щит)	4	22	3,8
Граниты, лейкограниты, нимнырский	4	38	4,5
Граниты плагиоклаз-микроклиновые, кировоградский (Украинский щит)	4,4	30	
Граниты, красногорский	5,2	44	
Лейкограниты, аляскиты (Курско-Воронежский массив)	17	21	4,0
Фанерозойские вулканогенные породы на кратонах [2]			
Кимберлиты (Сибирская платформа)	1,8	12,2	
Лимбургиты (Моймеча – Котуйская провинция)	2,1	13,0	
Трахиандезиты (там же)	2,7	16,0	
Пикритовые порфириты (Енисейский кряж)	2,4	6,5	0,9
Трахибазалиты (там же)	1,2	4,4	2,6
Пикриты (ВосточноАфриканская рифтовая зона)	0,75	3,7	1,9
Толеит океанический (Срединный Атлантический хребет)	0,1	0,18	0,14

Таблица 2. Радиоактивные элементы в метатерригенных отложениях раннепротерозойских осадочных бассейнов [6]

Порода, серия	U, г/т	Th, г/т	K, %
Тейская серия (Енисейский кряж)			
Метапелиты	3,1	14,5	3,3
Метапелиты углеродистые	4,1	24,1	3,6
Метапелиты глиноземистые	3,5	22,0	3,1
Гаревская серия (Енисейский кряж)			
Метапелиты	2,8	14,3	3,4
Метапелиты глиноземистые	3,1	19,0	3,5
Неройская серия (Присаянье)			
Метапелиты	2,9	14,1	3,1
Метапелиты глиноземистые, углеродистые	3,6	20,0	4,0
Иенгрская свита (Алданский щит)			
Метапелиты высокоглиноземистые	2,1	15,2	2,5
Курская серия (Курско-Воронежский массив)			
Метапелиты	4,2	13,7	3,9
Метапелиты глиноземистые	5,2	22,0	3,1
Криворожская серия (Украинский щит)			
Метапелиты верхней криворожской свиты	3,4	12,5	–
Метапелиты углеродистые	16,0	12,0	–
Метапелиты нижней криворожской свиты	5,1	60,0	–

кимберлитов Сибирского кратона в пределах мантии HIMU на изотопно-геохимической диаграмме, учитывающей величины и содержания U и Pb в базальтах MORB и OIB [5]. Геохимические различия верхней мантии Индо-Атлантического и Тихоокеанского сегментов являются изначальными, заложенными на поздней стадии аккреции Земли [3], поэтому верхняя мантия Индо-Атлантического сегмента способна генерировать сиалическую земную кору, что привело к геологической асимметрии Земли.

Важным открытием сейсмической томографии стало установление под архейскими кратонами своеобразных «корней» континентов (литосферных килей), сложенных высокоскоростной «холодной» верхней мантией мощностью до 200–600 км. Эти данные позволяют считать, что в архее плюмообразование охватывало только верхнюю палеомантию. «Корни» континентов – это остывшие истощенные реститы палеоплюмов, т. е. результат раннедокембрийского плюмового магматизма. Данные по изотопному датированию магматических пород мантийного происхождения в пределах кратонов свидетельствуют о том, что плюмовая магматическая деятельность продолжалась под их корнями, в нижней части верхней мантии в редуцированном виде в протерозое и фанерозое. С этой деятельностью связано образование траппов, кимберлитов, щелочно-ультраосновных комплексов в определенной степени обогащенных РАЭ (табл. 1).

Радиогеохимически аномальный состав архейской мантии под кратонами унаследован породами рециклированного верхнекорового слоя, в котором формировались коллизионные гранитоиды, а также верхнеархейские и нижнепротерозойские перекрывающие кратон терригенно-осадочные комплексы. Как видно из таблиц (табл. 1, 2), рециклированные гранитоиды и многие горизонты метатерригенных пород разных кратонов обогащены U и Th, что подтверждает основной тезис нашей работы об обогащенности РАЭ верхней мантии под кратонами.

Литература

1. Левский Л. К., Неймарк Л. А. В кн.: Ранняя кора: ее состав и возраст. – М.: Наука, 1991. – С. 48–62.
2. Миронов А. Г., Ножкин А. Д. Золото и радиоактивные элементы в рифейских вулканогенных породах и продуктах их метаморфизма. – Новосибирск: Изд-во Наука, 1978. – 254 с.
3. Мишкин М. А. Сиалическое корообразование, геохимическая гетерогенность мантии и асимметрия Земли // ДАН, 2012. – Т. 447. – № 2. – С. 195–198.

4. Мишкин М. А., Вовна Г. М. Ранняя сиалическая кора Земли: ее состав, происхождение и возраст. – Москва: Изд-во московского университета, 2017. – 175 с.
5. Мишкин М. А., Ножкин А. Д., Вовна Г. М., Происхождение ранней сиалической коры и изотопно-геохимическая U–Pb-гетерогенность мантии Земли // Доклады Академии Наук, 2018. – Т. 478. – № 6. – С. 669–673.
6. Ножкин А. Д. Радиоактивные элементы в метаморфизованных отложениях раннепротерозойских осадочных бассейнов: уровни накопления, значение для металлогении // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы IV Международной конференции (Томск 4–8 июня 2013); Томский политехнический университет. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2013. – С. 390–394.
7. Ножкин А. Д., Рихванов Л. П. // Радиоактивные элементы в коллизионных и внутриплитных натрий –калиевых гранитоидах: уровни накопления, значение для металлогении. – Геохимия, 2014. – №9. – С. 807–826.
8. Пущаровский Ю. М. В кн.: Тектоника в исследованиях Геологического института АН СССР. – М.: Наука, 1980. – С. 123–175.
9. Рундквист Д. В., Ряховский В. М., Миронов Ю. В. и др. // ДАН, 2000. – Т. 370. – №2. – С. 223–226.
10. Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. – М.: Наука, 1969. – 244 с.
11. Kamber B. C., Keenneth J., Collerson D., et al. // Contribs Mineral. And Petrol, 2003. – V. 145. – P. 25–46.
12. Nebel O., Münker C., Nebel-Jacobsen Y. J., et al. // Earth and Planet. Sci. Lett., 2007. – V. 254. – P. 377–392.

Th/U ОТНОШЕНИЕ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ МАЛЫХ ОЗЁР ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Е. А. Овдина, В. Д. Страховенко, Г. И. Малов

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН
Новосибирск, Россия, ovdina@igm.nsc.ru

TH/U RATIO IN BOTTOM SEDIMENTS OF SMALL LAKES (SOUTH OF WESTERN SIBERIA)

E. A. Ovdina, V. D. Strakhovenko, G. I. Malov

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
Novosibirsk, Russia, ovdina@igm.nsc.ru

Введение

На юге Западной Сибири насчитывается более 20 000 озёр, большинство из них являются малыми площадью менее 10 км^2 (Бейром и др., 1986; Штин, 2005; Тетельмин, Язев, 2009). В них особенно четко проявляется связь химического осадкообразования с физико-химической средой, так как в них практически исчезает фракционирование частиц по мере удаления от берега, с глубиной, с температурным клином, и чаще всего в зону ветрового перемешивания попадает практически вся толща воды.

Донные отложения исследуемых малых озёр юга Западной Сибири представлены сапропелями и минеральными илами. Сапропель – донные отложения водоемов, формирующиеся в результате биохимических, микробиологических и механических процессов из остатков отмирающих растительных и животных организмов и привносимых в водоемы органических и минеральных примесей. В зависимости от состава органической и минеральной частей (зольности) сапропели подразделяются на типы (Кордэ, 1969): органогенный с зольностью до 30 %; органоминеральный (30–50 %); минерально-органогенный (50–70 %); минерализованный (70–85 %). Донные отложения, для которых характерны значения зольности, превышающие 85% относятся к минеральным илам. Химический состав минеральной части отличается составом: резко преобладают SiO_2 и CaO, по соотношению Si/Ca выделяют классы во всех типах, кроме органогенного: кремниевый (Si > Ca); кальциевый (Ca > Si), смешанный (Si ~ Ca) По доминирующей первичной продукции выделяют виды планктоногенный, макрофитогенный, планктоно-макрофитный и макрофито-планктонный (Страховенко и др. 2014; 2016).

Юг Западной Сибири располагается на границе климатических зон, что определяет резко континентальный климат территории с повышением степени аридизации в южной части. В целом характерно жаркое сухое лето и холодная зима, продолжитель-

ностью до 7–9 месяцев. Вследствие длительного периода ледостава на ледовой поверхности озера аккумулируется эоловый материал и в весенне-летний период таяния ураганно сносится в озеро. Преимущественно осадочные образования четвертичного возраста представлены на территории юга Западной Сибири. Почвообразующие породы представлены озерно-аллювиальными и субаэральными лессовидными отложениями преимущественно суглинистого гранулометрического состава с разной степенью засоления. Минеральный состав почвообразующих пород по большей части определяется составом коренных пород Алтае-Саянской горной системы и Казахского мелкосопочника (Ильин, Сысо, 2007; Страховенко, 2011). В нем преобладают минералы легкой фракции: кварц, полевые шпаты, слюды. Все они содержат малые количества элементов примесей (Страховенко, 2011).

Центральная часть Западно-Сибирской плиты относится к зонам пониженной радиации, т. к. естественные радионуклиды, содержащиеся в горных породах и почвах территории имеют низкие значения радиационной дозы. Естественный радиационный фон определяется содержаниями естественных радиоактивных элементов: урана, тория, калия. Так как в тех или иных количествах эти элементы встречаются во всех природных объектах, а их повышенные содержания могут быть потенциально опасными, то основой требований к сапропелевому сырью является его экологическая безопасность: содержание токсичных элементов, естественная и искусственная радиоактивность. Изучение закономерностей формирования и диагенеза донных отложений важно не только с целью реконструкции истории озера и его водосборного бассейна, но и для решения серии геоэкологических задач – разработки научных основ рационального использования, охраны и контроля водных ресурсов в условиях изменения природной среды под влиянием природных и антропогенных факторов.

Объектами исследования являются 46 малых озер юга Западной Сибири (Васюганская равнина, Барабинская низменность, Кулундинская равнина) (Рис. 1). Отобрано 1364 пробы донных отложений, 295 проб воды. Пробоотбор происходил по стандартным методикам ГОСТ (ГОСТ Р 54519, 2011; ГОСТ 31861, 2012).

Цель работы – анализ Th/U отношения в донных отложениях малых озер юга Западной Сибири в зависимости от типа, класса донных отложений, доминирующей первичной продукции и гидрологических параметров воды.

Материалы и методы

Использованы материалы полевых и аналитических работ 2012–2019 гг. Пробоотбор донных отложений производился с катамарана цилиндрическим пробоотборником с вакуумным затвором (диаметр 82 мм, длина 95 см), разработанным НПО «Тайфун», Россия. Разбор керна донных отложений происходил с интервалом 3–5 см на глубину 50–120 см. Физико-химические переменные фиксировались *in situ* (pH, Eh, общая минерализация воды, содержание O_2).

Исследования химического состава образцов донных отложений проводились в Центре коллективного использования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, г. Новосибирск. Определение содержания естественных (^{232}Th, ^{238}U(Ra), ^{40}K) радионуклидов проводилось гамма-спектрометрическим методом на колодезном коаксиальном детекторе из сверхчистого

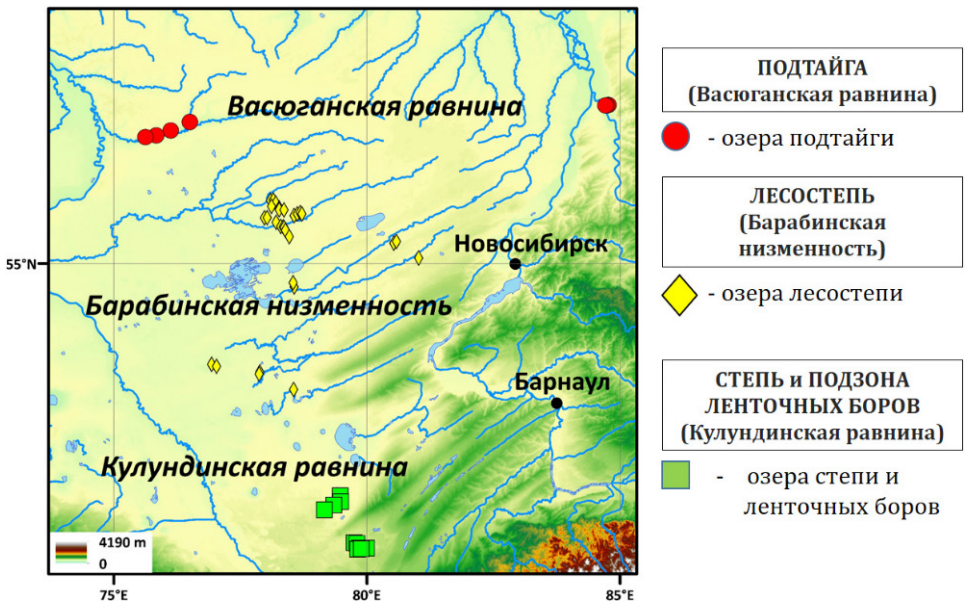


Рис. 1. Карта-схема расположения исследуемых малых озёр юга Западной Сибири

Таблица 1. Параметры распределения естественных (^{232}Th, ^{238}U(Ra), ^{40}K) радионуклидов (г/т) в донных отложениях малых озер юга Западной Сибири

Параметр распределения	Th	U(Ra)	Th/U	K
ср±ст.откл.	3,8 ± 2,3	2,1 ± 0,7	1,9 ± 1,0	0,9 ± 0,7
мин…макс	0,6…8,5	0,7…4,0	0,3…5,0	0,04…4,4

ср ± ст.откл. – среднее арифметическое ± стандартное отклонение; мин…макс – минимум … максимум.

германия (HPGe) с предусилителем и низкофоновым криостатом EGPC 192-P21/SHF 00-30A-CLF-FA («Eurysis Mesures», Франция).

Результаты и их обсуждение

Наиболее распространены донные отложения органоминерального и минерально-органогенного типа. Распределение по классам (соотношению Si/Ca) среди всех рассмотренных озер происходит неравномерно, с преобладанием озёр с кремниевым классом отложений. Из 46 рассмотренных озёр, 22 озера относятся к кремниевому классу, 10 озёр к кальциевому и 13 к смешанному.

Терригенная составляющая донных отложений всех рассмотренных малых озёр юга Западной Сибири ландшафтных зон подтайги, лесостепи, степи и подзоны ленточных боров представлена на 60–80 % неокатанными и/или слабо окатанными зернами кварца, полевых шпатов, слюд. В виде одиночных неокатанных зерен встречены акцессорные минералы: ильменит, магнетит, рутил, циркон (Страховенко, 2011). Аутигенные минералы представлены - аутигенным кремнеземом, карбонатами кальцит-доломитового ряда и/или арагонитом, пиритом (фрамбоиды, одиночные кристаллы, скопления) и иллит-смектитами (редко).

По содержанию главных ионов состав вод озер, в целом, изменяется от гидрокарбонатно магниево-кальциевых пресных до хлоридно-натриевых рассолов. Обобщая все полученные аналитические данные для всех рассмотренных озер, можно проследить общеизвестный тренд метаморфизации вод юга Западной Сибири с севера на юг, однако он осложняется присутствием большого количества малых озер с гидрокарбонатно-натриевым (содовым) составом вод. Формирование озёрных вод полного спектра солёности, в т. ч. содовых, обусловлено особенностями гривного рельефа Барабинской низменности и Кулундинской равнины, вследствие чего происходит местное перераспределение влаги и легкорастворимых солей: их переток с грив в межгривное пространство, а также составом почвообразующего субстрата – лессовидных суглинков (Ильин, Сысо, 2001).

Известно, что содовые воды, которые встречаются в рассматриваемых ландшафтных зонах, способствуют обильному развитию биоты (Страхов, 1954; Заварзин, 1993). Развитие биоты различных видов (альгобактериальные маты, дрейфующие на поверхности воды макрофиты/водоросли, погруженные макрофиты и/или водоросли) в свою очередь ведет к процессам концентрирования и перераспределения вещества, а также к локальным изменениям среды в водной толще (Кузнецов, 2003).

Среднее содержание урана и тория в донных отложениях ландшафтных зон юга Западной Сибири представлены в Таблице 1. Содержание тория достаточно выдержано, что указывает на его накопление преимущественно в составе терригенной (обломочной и эоловой) фракций. Для большинства изученных донных отложений малых озер Th/U отношение варьирует от 0,3 до 5,0.

На рис. 2 представлен график, отражающий положение донных отложений в зависимости от типа и класса в координатах Th–U, из которого можно сде-

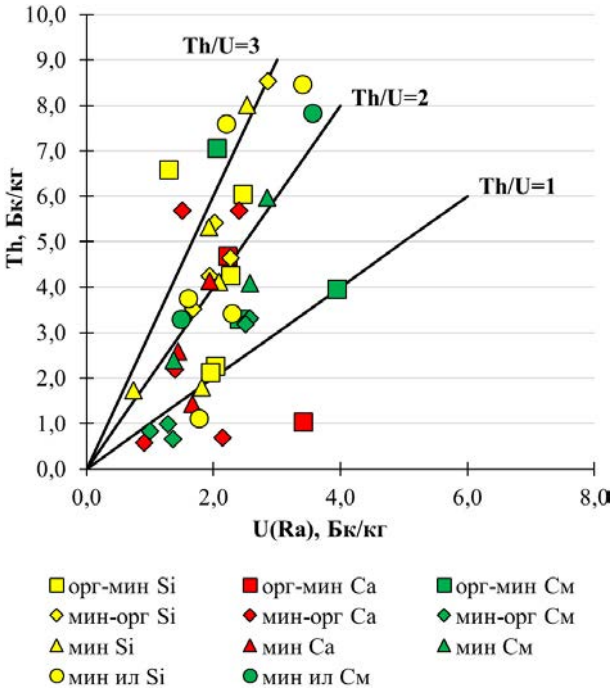


Рис. 2. Радиогеохимическая характеристика донных отложений малых озер юга Западной Сибири с учетом типа и класса донных отложений

Типы: орг-мин – органоминеральный, мин-орг – минерально-органогенный, мин – минерализованный, мин ил – минеральный ил. Классы: Si – кремниевый, Ca – кальциевый, См – смешанный.

лать вывод о том, что преимущественно преобладают донные отложения со смешанной торий-урановой природой радиоактивности.

Это связано с привносом терригенной составляющей в донные отложения, особенно в весенне-летний период таяния, когда эоловая фракция, аккумулированная в осенне-зимний период ледостава на поверхности озера, ураганно сносится в него. Состав вод, значение общей минерализации (от 0,02 до 396,6 г/л) и pH (от 6,3 до 10) не имеют корреляционной связи с Th/U соотношением в донных отложениях озер, как и вид доминирующей первичной продукции.

Для ряда озер юга Западной Сибири кальциевого и смешанного класса донных отложений торий-урановое отношение < 1, что указывает на преимущественное концентрирование урана по сравнению с торием. Наиболее вероятный механизм накопления U – сорбция на органическом веществе. По виду доминирующей первичной продукции все вышеупомянутые озера кальциевого класса относятся к планктоно-макрофитному виду. Зависимости Th/U отношения в донных отложениях от pH (от 7,63 до 9,30), состава озёрных вод и значения общей минерализации воды (от 0,2 до 396,6) при этом также не прослеживается.

Таблица 2. Параметры распределения естественных (^{232}Th, ^{238U}(Ra)) радионуклидов (г/т) в донных отложениях кальциевого класса малых озер юга Западной Сибири

Параметр распределения	Th	U(Ra)	Th/U
ср ± ст.откл.	0,9 ± 0,3	1,8 ± 0,8	0,6 ± 0,2
мин…макс	0,6…1,4	0,9…3,4	0,3…0,9

Заключение

Для донных отложений малых озер юга Западной Сибири характерно преимущественно смешанная торий-урановая природа радиоактивности. Торий привносится в донные отложения с терригенным сносом, а также со значительным количеством эолового материала в весенне-летний период.

Урановая природа радиоактивности (Th/U < 1) донных отложений характерна для ряда озер с кальциевым и смешанным классом отложений, все они относятся к планктоно-макрофитному виду по виду доминирующей первичной продукции.

Четкой связи Th/U отношения в донных отложениях малых озер юга Западной Сибири с физико-химическими параметрами озерных вод не прослеживается.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Литература

1. Бейром С. Г. Природные ресурсы Новосибирской области / С. Г. Бейром, И. П. Васильев, И. М. Гаджиев. – Новосибирск: Наука, 1986, – 215 с.
2. ГОСТ 31861-2012 Вода. Общие требования к отбору проб. // М., Стандартинформ, 2013. – 31 с.
3. ГОСТ Р 54519-2011 Удобрения органические. Методы отбора проб. // М., Стандартинформ, 2012. – 7 с.
4. Заварзин Г. А. Эпиконтинентальные содовые водоемы как предполагаемые реликтовые биотопы формирования наземной биоты / Г. А. Заварзин // Микробиология, 1993. – 62 (5). – С. 789–800.
5. Ильин В. Б., Сысо А. И. Почвенно-геохимические провинции в Обь-Иртышском междуречье: причины и следствия / В. Б. Ильин, А. И. Сысо // Сибирский экологический журнал, 2001. – № 2. – С. 111–118.
6. Кордэ Н. В. Биостратиграфия и типология русских сапропелей. – Москва: Изд-во АН СССР, 1969. – 219 с.
7. Кузнецов В. Г. Эволюция карбонатонакопления в истории Земли. – Москва: ГЕОС, 2003. – 262 с.
8. Страхов Н. М., Бродская Н. Г., Князева Л. М., Разживина А. Н., Ратеев М. А., Сапожников Д. Г., Шитова Е. С. Общая схема осадкообразования в современных морях и озерах малой минерализации / Н. М. Страхов, Н. Г. Бродская, Л. М. Князева, А. Н. Разживина, М. А. Ратеев, Д. Г. Сапожников, Е. С. Шитова // Образование осадков в современных водоемах, 1954. – С. 275–377.
9. Страховенко В. Д. Геохимическая характеристика сапропелей Новосибирской области / В. Д. Страховенко, Н. А. Росляков, А. И. Сысо, Н. И. Ермолаева, Е. Ю. Зарубина, О. П. Таран, А. В. Пузанов // Водные ресурсы, 2016. – 43 (3). – С. 336–344. https://doi.org/10.7868/S0321059616030160.
10. Страховенко В. Д. Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири: автореф. дис. … д. геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2011. – 33 с.
11. Страховенко В. Д., Таран О. П., Ермолаева Н. И. Геохимическая оценка сапропелевых отложений малых озер Обь-Иртышского междуречья / В. Д. Страховенко, О. П. Таран, Н. И. Ермолаева // Геология и Геофизика, 2014. – 55 (10). – С. 1466–1477.

12. Тетельмин В. В. Геоэкология углеводородов / В. В. Тетельмин, В. А. Язев. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 304 с.

13. Штин С. М. Озерные сапропели и основы их комплексного освоения. – Москва: Изд-во Московского государственного горного университета, 2005. – 373 с.

РАДИОИЗОТОПНЫЕ МЕТОДЫ ПРИ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

Т. М. Овсянникова, Н. А. Гребенкин, Д. А. Прохоров,
А. В. Стародубов, Д. М. Машнин, И. С. Тубольцев

Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского
Москва, Россия, lima@u238.ru

RADIOISOTOPIC METHODS IN EXPLORATION OF URANIUM DEPOSITS

T. M. Ovsyannikova, N. A. Grebenkin, D. A. Prokhorov, A. V. Starodubov, D. M. Mashnin, I. S. Tuboltsev

All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N. M. Fedorovsky
Moscow, Russia, lima@u238.ru

The article dwells on the results of experimental studies on concealed and semi-concealed uranium deposits of different types that helped determine surface-level isotopic indicators of uranium mineralization to be potentially used for exploration purposes. The indicators/pathfinders include $^{210}Po \times {}^{210}Pb$ and $^{234}U/^{238}U$ isotopes in the weak hydrochloric acid and sodium carbonate extracts from soil samples; U, Mo, As, Bi, Pb and $^{207}Pb/^{206}Pb$ in «nanoparticles» adsorbed on charcoal collectors; as well as total alpha-activity in plant ash samples.

Введение

По мере исчерпания запасов урана формируется запрос на поисковые методы, в том числе геохимические, позволяющие выявлять скрытые и слабопроявленные объекты в сложных геологических, ландшафтно-геоморфологических и климатических обстановках, когда известные поисковые критерии и признаки не эффективны. Их возможности и перспективы связаны с установлением новых геохимических закономерностей, характеризующих образование и последующие изменения искомых объектов, а также с постоянным совершенствованием аналитических технологий. Применение радиоизотопных методов для поисков месторождений урана требует: 1) систематизации данных о закономерностях распределения и поведения радиоактивных и радиогенных изотопов в природных условиях; 2) установления механизмов и создание моделей формирования изотопно-геохимических ореолов вокруг рудных тел; 3) выбора наиболее перспективных изотопных критериев и признаков оруденения; 4) подбора оптимальных аналитических методов и технологий определения изотопных параметров (или их разработки/модификации); 5) разработки рекомендаций по применению поисковых комплексов методов и интерпретации полученных данных. Решению некоторых из этих задач были посвящены опытно-методические работы (ОМР), реализованные на урановых месторождениях различных геолого-промышленных типов (Юго-Западное, Широндукуйское, Тетрахское, Столбовое).

Месторождения Юго-Западное и Широндукуйское располагаются в пределах Стрельцовской кальдеры, в геологическом строении которой принимают участие породы 2-х структурных этажей: палеозойского гранит-метаморфического фундамента и гетерогенного вулканогенно-осадочного чехла юрско-мелового возраста.

Юго-Западное месторождение находится в юго-западной части кальдеры и почти целиком локализовано в эффузивных породах кислого состава. Месторождение представлено несколькими рудными зонами, которые суммарно прослеживаются на 2 км, имея ширину 150–300 м. Рудные тела представлены многочисленными крутопадающими жилами. Их глубина залегания колеблется от 40 до 550 м от земной поверхности; мощность варьирует в пределах 0,30–13,0 м, содержание урана — в диапазоне 0,050–0,234 %.

Широндукуйское месторождение располагается в северо-восточной части кальдеры. Оно локализовано в гранитах, трахидацитах и андезито-базальтах. Урановое оруденение залегает на глубинах от 90 до 350 м. На месторождении проявлены два морфологических типа рудных залежей: жилообразные и штокверкоподобные. В гранитах, базальтах и андезитах развиты только жилообразные залежи, приуроченные к крутопадающим разломам субмеридионального и северо-восточного простирания и отличающиеся простым строением, небольшой протяженностью (100–150 м) и размахом оруденения по вертикали 50–70 м. Рудные тела, локализованные в

трахидацитах, имеют штокверкоподобную форму с раздувами и апофизами (высота раздувов 30–50 м, протяженность 200–300 м). Всего на месторождении выделено 48 жилообразных и 17 штокверкоподобных рудных тел. Балансовые руды в целом рядовые с вариациями содержаний урана от 0,050 до 2,6 %.

Тетрахское месторождение расположено на южном склоне Байсыханского хребта недалеко от Хиагдинского месторождения (Витимский УРР). Оруденение локализовано в палеодолине, врезанной в кристаллический фундамент, в проницаемых вулканогенно-осадочных отложениях неогена (N_1), перекрытых плато базальтов. Линейно-ориентированная основная рудная залежь, линзовидная субгоризонтальная в разрезе и лентообразная в плане, находится в средней и верхней части палеодолины, а также в ее правом притоке на глубинах до ~ 200 м. Длина залежи в основной палеодолине 4 км, в палеопритоке – 2,5 км, ширина от первых сотен метров до 0,8–1,2 км; мощность изменяется от десятков сантиметров до 20 и более метров. Содержание урана варьирует в пределах 0,016–0,252 % с максимумом в центральной части и постепенным уменьшением к верховьям и низовью палеодолины. Ландшафтно-геоморфологические условия на участке благоприятны для проведения геохимического опробования: развиты почвы и растительность, с момента проведения последних ГРР прошло более 25 лет, т. е. антропогенное воздействие на территорию минимально.

Месторождение Столбовое входит в ряд малых урановых месторождений типа структурно-стратиграфического несогласия (ССН), территориально относящихся к юго-западному обрамлению Сибирской плиты. В геологическом строении объекта выделяются 2 структурных этажа: нижнепротерозойский гранито-гнейсовый фундамент, выветрелый в верхней части (мощность коры 1–20 м), и субплатформенные осадочные образования средне-верхнерифейского чехла, с резким угловым и стратиграфическим несогласием залегающие на коре выветривания цоколя. На объекте широко проявлены гидротермально-метасоматические образования, в том числе с урановой минерализацией. Вскрытое эрозией урановое оруденение локализовано в сближенных зонах субмеридионального простирания среди гранитоидов и метаморфитов фундамента. Протяженность отдельных урановосных зон составляет первые сотни метров и достигает 2 км; мощность варьирует от первых метров до 250 м. В пределах рудных зон установлено около 40 жилообразных и линзовидных рудных тел протяженностью по простиранию и падению от нескольких десятков метров до 200 м, с раздувами и пережимами, со средней мощностью от 0,4 до 2,5 м. При среднем оцениваемом содержании урана 132 %, в отдельных маломощных линзах в поверхностных выработках содержания достигают первых процентов, в скважинах – первых n • 0,1 %. В 2015 г. в юго-восточной части месторождения в гранитоидах фундамента выявлены «слепые» настуран-кварцевые жилы мощностью первые метры и с содержаниями урана от 0,1 до 1,48 %.

Материалы и методы

На объектах были запланированы и проведены геохимические исследования тем или иным комплексом методов (табл. 1).

Изотопно-почвенный метод (ИПМ) позволяет локализовать погребенное урановое оруденение по аномальным почвенным ореолам мультипликативного показателя (МП) ^{210}Po и ^{210}Pb (дочерних продуктов распада ^{238}U) в солянокислых вытяжках (МП = ^{210}Po × ^{210}Pb); глубинность метода достигает 600 м [1, 2]. В некоторых случаях для оценки аномалий ИПМ привлекается анализ изотопных отношений урана (^{234}U/^{238}U), экстрагируемого из тех же почвенных проб разбавленным содовым раствором.

Определение общих альфа- и бета-активностей в озоленных пробах растительности – одно из перспективных (в т. ч. в связи с простой применения и минимальными затратами) направлений биогеохимических исследований, в целом отличающихся повышенной глубинностью, контрастностью аномалий и другими преимуществами [5].

Также применена специально разработанная технология, относящаяся к относительно новой группе атмогеохимических (газовых) методов по «нанофракциям», основанных на определении элементного состава механических агрегатов частиц сверхмалых размеров (10–200 нм), транспортируемых постоянным потоком геогаза в направлении

Таблица 1. Геохимические методы, использованные при ОМР

Методы / месторождения	Юго-Западное	Широнду-куйское	Тетрахское	Столбовое
ИПМ (МП)	+	+	+	+
^{234}U/^{238}U (содовые вытяжки)	–	–	+	–
Общая активность (растительность)	+	+	+	+
Элементы, МП (растительность)	–	–	–	+
Атмогеохимия («нанофракции»)	+	+	+	–
Атмогеохимия (изотопы Pb)	+	+	–	–
^{222}Rn (гамма-спектрометрия)	–	–	+	–

земной поверхности и селективно извлекаемых с помощью специальных коллекторов [6, 7, 10–12, 14]. Схема опробования включала длительную экспозицию угольных коллекторов в почвенных шпурах, извлечение (экстракцию) «нанофракций» в раствор и последующий мультиэлементный анализ ICP-MS, в т. ч. с определением изотопных отношений свинца ($^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{206}Pb$), которые могут служить прямым признаком длительно существующего уранового оруденения [8, 9, 13].

Наземная радиометрическая съемка с СРП-68 (без свинцового экрана) и отбор проб (почвы и др.) выполнялись сотрудниками ФГБУ «ВИМС». На всех объектах отбор проб осуществлялся на тех же точках, что и при проведении других видов исследований. До начала ОМР экспериментально были подобраны оптимальные процедуры опробования, обеспечивающие требуемый уровень достоверности и воспроизводимости результатов, в том числе режим озоления проб растительности, установлены временные и другие параметры измерений.

На месторождениях Юго-Западное и Широндукуйское отбор проб осуществлялся по двум профилям на каждом из объектов (соответственно 64, 120, 159, 164); шаг между пикетами составлял 25–50 м со сгущением в центральной части профиля (над основной рудной зоной). По данным наземной радиометрии месторождение Широндукуйское было отнесено к скрытым объектам (нет радиометрических аномалий); на месторождении Юго-Западное над рудной зоной было зафиксировано повышение общей активности (до 2 раз над уровнем фона), поэтому оруденение отнесено к слабопроявленному типу. Установка и экспозиция газовых коллекторов выполнялась в шпурках глубиной около 1 м, которые помечались сигнальным флажком и в GPS-навигаторе; спустя 15 суток детекторы были извлечены, герметично закрыты и упакованы для транспортировки; в лаборатории получены азотнокислые вытяжки из углей и выполнен анализ ICP-MS (61 элемент, изотопия свинца). В качестве биоиндикаторов отбирали верхние части корневой системы мятлика лугового (лат. *Poa praténsis*) и лука-слизуна (лат. *Allium nutans*). После доставки проб в лабораторию их промывали, высушивали, предварительно измельчали с помощью секатора, затем навески массой 10 г помещали в фарфоровые чашки и озоляли в муфельной печи при постепенном повышении температуры в диапазоне 100–550 °С. Золу дотирали до однородного состояния, переводили в кюветы и измеряли активность на радиометре.

При двухгодичных работах на Тетрахском месторождении съемка ИПМ выполнялась по профилям 36, 39, 42, 46, 50, 70. Пробы отбирали с шагом в 25–50 м; на каждой точке проводили зачистку от верхнего почвенного слоя, рытье закопушки глубиной 10–25 см, радиометрические измерения, отбор почвы и предварительное просеивание. На профиле 42, пройденном над средней частью палеодолины, и профиле 70, расположенном в «безрудном» верховье палеодолины, проведен отбор проб растительности (коры березы и лиственницы) и «нанофракций», сорбированных угольными коллекторами.

На месторождении Столбовое работы выполнялись на одном «эталонном» профиле. При опробовании ИПМ пробы почвогрунта, при его наличии на точках отбора (на участке почвы развиты не повсеместно, мощность почвенного слоя не выдержана, присутствуют курумы), брали из закопушек глубиной 10–25 см. Отбор проб растительности (внешняя кора и ветви березы, ветви сосны и ели, мхи) осуществляли вблизи точек ИПМ; в озоленных пробах определяли общие альфа-и бета-активности, а также, после разложения царской водкой, произведение активностей $^{210}Po \times {}^{210}Pb$ и элементный состав. Также для оценки поверхностных геохимических аномалий было исследовано 50 проб керна скважин с разных глубин (для них установлен элементный состав и изотопные отношения свинца).

Лабораторные работы выполнялись в лаборатории изотопных методов анализа ФГБУ «ВИМС» с использованием инструкций [3, 4] и аппаратуры: «Ortec Octete/Ocpl-U0600-PPS230» (США), «Berthold LB-770» (Германия), «УМФ-2000М» (Россия), «Ortec GEM-65195p/DSPec» (США). Масс-спектральный анализ выполнен сотрудниками института Б. Г. Кареповым и Д. В. Григорьевым (методика НСАМ 499-АЭС/МС, «Elan-6100»).

Результаты и их обсуждение

Месторождение Юго-Западное (слабо проявленное). Рудные тела фиксируются высококонтрастными аномалиями общей альфа-активности проб растительности, а также менее интенсивными коррелирующими между собой атмогеохимическими аномалиями рудных компонентов (U, Mo) или элементов-спутников (As, Bi). На профиле 120 отмечено слабое повышение содержания радиогенного ^{206}Pb в «нанофракциях» (при фоновых значениях $^{207}Pb/^{206}Pb$) непосредственно над рудной зоной, а также по ее периферии. На профиле 64 распределение радиогенного свинца практически фоновое. Выявленные интенсивные аномалии МП ($^{210}Po \times {}^{210}Pb$) отражают пространственное положение оруденения, но в большей мере тяготеют к его периферии, что, по всей видимости, связано с активным притоком радона по ослабленным (разуплотненным) зонам.

Месторождение Широндукуйское (скрытое). На профиле 164 рудные зоны фиксируются комплексными атмогеохимическими аномалиями элементов-индикаторов (U, Mo, As, Bi) разной интенсивности, пространственно коррелирующими с областями повышенной альфа-активности в пробах растительности и МП ($^{210}Po \times {}^{210}Pb$). Контрастные ореолы «аномального» радиогенного свинца (^{206}Pb,

$^{207}Pb/^{206}Pb$) установлены непосредственно над основной рудной зоной (пикеты 60–90), а также справа от нее (122–120), где они частично «перекрываются» аномалиями Mo и МП ($^{210}Po \times ^{210}Pb$). На «безрудном» профиле 159 распределение био- и атмогеохимических индикаторов (кроме Mo) не имеет четко выраженных коррелирующих максимумов; в левой краевой части профиля выявлена протяженная аномалия Mo в «нанофракциях».

Месторождение Тетрахское (скрытое). Для аномалий МП ($^{210}Po \times ^{210}Pb$) характерна приуроченность к периферии проекций рудных палеодолин (бортам). На профиле 42 по данным шпуровой радиометрии поверхностного концентрирования радионуклидов не выявлено, радиометрический фон низкий. Напротив, на «безрудном» профиле 70 радиометрический фон в целом повышен и имеет несколько слабо выраженных максимумов, что, по-видимому, объясняется поверхностным рассеянием обломочной фракции гранитоидов. Распределение активностей изотопов урана и показателя ($^{234}U \times ^{234}U)/^{238}U$ в содовых вытяжках на профиле 70 практически повторяет вариации радиометрического фона, в то время как над рудной палеодолиной (профиль 42) наблюдаются слабые аномалии ^{234}U, ^{238}U и ($^{234}U \times ^{234}U)/^{238}U$.

Над основной рудной зоной выявлены контрастные аномалии U в «нанофракциях», сорбированных газовыми коллекторами, и общей альфа-активности в пробах коры лиственницы; по периферии оруденения регистрируются повышенные концентрации Pb и значения отношения U/Th в «нанофракциях». На профиле 70 аномалии сорбированных «нанофракций» не установлены (биогеохимические пробы на профиле не отбирались).

В правой части профиля 46 фиксируются протяженные высокоинтенсивные аномалии U и Pb в «нанофракциях», а в его центральной части — аномалия U/Th; все они пространственно коррелируют с ореолами повышенных значений МП ($^{210}Po \times ^{210}Pb$). Графики распределения общей альфа-активности в пробах коры лиственницы и U/Th в «нанофракциях» демонстрируют определенное сходство; повышенные значения альфа-активности смещены влево от центра профиля (пикеты 14, 16–20).

На профиле 36 оруденение проявлено повышением содержания Pb в «нанофракциях» и также контрастной аномалией U/Th (пикеты 21–25), пространственно совпадающими с аномалиями МП ($^{210}Po \times ^{210}Pb$). По биогеохимическим данным наблюдается общий рост альфа-активности в правой части профиля и очень слабые аномалии ближе к его центральной части (пикеты 23–25).

На профиле 50 проявлены аномалии U и Pb в «нанофракциях»; их уровни в целом выше, чем для профиля 42, но существенно ниже, чем для профиля 46. В вариациях U/Th на профиле заметны две области повышенных значений, слева (пикеты 11–16) и с небольшим смещением вправо от центра (пикеты 21–24), что в общем соответствует положению палеопритоков. Распределение общей альфа-активности в биогеохимических пробах на профиле выраженных экстремумов не имеет.

Месторождение Столбовое (скрытое, в пределах участка). По результатам почвенного опробования выявлено слабое повышение показателя МП ($^{210}Po \times ^{210}Pb$) над рудной зоной – вблизи скважин С18–С25 (анализ и интерпретация были затруднены в связи с неполнотой данных ИПМ). Над оруденением (скважины С18–25, С1) фиксируются совпадающие биогеохимические аномалии при наиболее высокой контрастности ореолов альфа-активности и показателя $^{210}Po \times ^{210}Pb$ в ветках ели и березы. Для всех исследованных видов и частей растений четко проявлен рост общей альфа-активности в трехнедельном временном интервале, что указывает на присутствие в них ^{226}Ra и накопление его дочерних продуктов распада. Элементным анализом выявлены низкоинтенсивные надрудные биогеохимические аномалии урана и других элементов (Mn, B, S, K, Ag, Cd, Gd, TR, Pb, Cu, Zn).

Заключение

По результатам ОМР и лабораторных исследовательских работ можно сделать следующие выводы.

Геохимический комплекс методов с использованием нескольких изотопных показателей, в т. ч. МП ($^{210}Po \times ^{210}Pb$), $^{234}U/^{238}U$ в содовых вытяжках, U, ^{206}Pb, $^{206}Pb/^{206}Pb$ в «нанофракциях», сорбированных угольными коллекторами, общая альфа-активность проб растительности (коры лиственницы, корневой системы многолетних травянистых растений), позволяет решить задачу выявления и локализации скрытых и слабо проявленных месторождений урана разных типов.

Наиболее эффективным индикатором скрытого оруденения уран-молибденового типа является общая альфа-активность биогеохимических проб: интенсивные контрастные аномалии проявлены почти над всеми рудными телами, количество ложных сигналов минимально, метод прост в реализации, не требует участия высококвалифицированных специалистов и применения сложного дорогостоящего оборудования. Для оценки рудных концентраций (т. е. выделения наиболее перспективных участков) может быть привлечен анализ отношений радиогенного свинца (^{206}Pb, ^{207}Pb) в «нанофракциях», сорбированных угольными коллекторами.

На месторождениях палеодолинного типа биогеохимическое опробование необходимо комплексировать с ИПМ ($^{210}Po \times ^{210}Pb$) и/или определением «нанофракций» металлов, для успешной реализации которого требуется дальнейшее усовершенствование процедуры отбора проб и лабораторного анализа (с целью уменьшения «методического» фона).

Наземная радиометрическая съемка эффективна для отбраковки поверхностных аномалий, не связанных с оруденением.

Для месторождений урана типа «несогласия», в т. ч. находящихся в сложных геологических, ландшафтно-геоморфологических и климатических обстановках, с учетом отсутствия выдержанного почвенного слоя, развития курумов, высокой степени расчлененности рельефа наиболее оправдано использование биогеохимического опробования с определением общей альфа-активности озоленных проб растительности.

Авторы выражают искреннюю благодарность персоналу АО «Урангео», АО «Хиагда» и ПАО «ППГХО» за предоставленные геологические материалы, а также помощь и содействие в проведение опытно-методических работ.

Литература

1. Бахур А. Е., Коноплев А. Д., Зуев Д. М. и др. Изотопно-почвенный метод и его современные модификации при поисках слепого уранового оруденения // Разведка и охрана недр, 2011. – № 1. – С. 52–59.
2. Бахур А. Е., Овсянникова Т. М., Мануилова Л. И. и др. Радиоизотопные методы при поисках и оценке инфильтрационных месторождений урана в Южном Казахстане // Информационный сборник: Материалы по геологии, поискам и разведке месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. – М.: РИС ВИМС, 2015 – Выпуск 159. – С. 363–377.
3. Инструкция по применению изотопно-геохимических методов с частичной экстракцией при поисках скрытых и слабопроявленных месторождений урана / (редакция 2). – ФГБУ «ВИМС», 2018.
4. Инструкция по применению биогеохимических методов при поисках скрытых и слабопроявленных месторождений урана (редакция 2). – ФГБУ «ВИМС», 2018.
5. Овсянникова Т. М. Биогеохимические методы поисков скрытых месторождений // Разведка и охрана недр, 2019. – № 2. – С. 3–11.
6. Cao J. J., Hu X. Y., Jiang Z. T., Li H. W., Zou X. Z. Simulation of adsorption of gold nanoparticles carried by gas ascending from the Earth's interior in alluvial cover of the middle-lower reaches of the Yangtze River., 2010. URL: https://onlinelibrary.wiley.com (дата обращения: 08.04.2021).
7. Cao J. J., Li Y. K., Jiang T., Hu G. Sulfur-containing particles emitted by concealed sulfide ore deposits: an unknown source of sulfur-containing particles in the atmosphere, 2015. URL: https://www.researchgate.net (дата обращения: 08.04.2021).
8. Carlson W. R. Heavy Minerals in Soils from the Athabasca Basin and the Implications for Exploration Geochemistry of Uranium Deposits at Depth, 2016. URL: https://qspace.library.queensu.ca (дата обращения 08.04.2020).
9. Holk G. J., Kyser T. K., Chipley D. et al. Mobile Pb-isotopes in Proterozoic sedimentary basins as guides for exploration of uranium deposits, 2003. URL: https://www.researchgate.net (дата обращения 08.04.2020).
10. Hu G., Cao J. J., Hopke P. K., Holub R. F. Study of carbon-bearing particles in ascending geogas flows in the Dongshengmiao polymetallic pyrite deposit, Inner Mongolia, China, 2015. URL: https://www.researchgate.net (дата обращения 08.04.2020).
11. Hu G., Cao J. J., Lai P. X. Characteristics and geological significance of particles on fractures from the Dongshengmiao polymetallic pyrite deposit, Inner Mongolia, China, 2015. URL: https://www.researchgate.net (дата обращения 08.04.2020).
12. Jiang T., Cao J., Wu Z. et al. A TEM study of particles carried by ascending gas flows from the Bairendaba lead–zinc deposit, Inner Mongolia, China, 2018. URL: https://www.researchgate.net (дата обращения: 08.04.2021).
13. Kyser K., Lahusen L., Drever, G. et al. Using Pb Isotopes in Surface Media to Distinguish Anthropogenic Sources from Undercover Uranium Sources, 2015. URL: https://www.sciencedirect.com (дата обращения: 08.04.2021).
14. Zhang B., Han Z., Wang X. et al. Metal-Bearing Nanoparticles Observed in Soils and Fault Gouges over the Shenjiayao Gold Deposit and Their Significance, 2019. URL: https://www.mdpi.com (дата обращения 08.04.2020).

РЕШЕНИЕ ПРИКЛАДНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ С ПОМОЩЬЮ РАДИОИЗОТОПНЫХ МЕТОДОВ

Т. М. Овсянникова, А. Е. Бахур, А. В. Стародубов, Д. А. Прохоров

Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского
Москва, Россия, lima@u238.ru

RADIOISOTOPIC METHODS IN APPLIED ISSUES OF GEOLOGY AND GEOECOLOGY

T. M. Ovsyannikova, A. E. Bakhur, A. V. Starodubov, D. A. Prokhorov

All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N. M. Fedorovsky
Moscow, Russia, lima@u238.ru

The article provides various examples of employing radioisotopic methods in geology and geoecology, including mapping of fault tectonic zones, measuring specific activities of key radionuclides to correct radiological classifications for rare metal ores, conversion products, and wastes, as well as assessing radium-224 content in water samples by changes in their total activities.

Введение

Радиоизотопные методы позволяют решить множество прикладных задач, как геологических, так и геоэкологических, из которых для рассмотрения выбрано несколько примеров.

1. Картирование вертикальных разрывных тектонических нарушений (разломов) является необходимым этапом планирования сети буровых скважин, предназначенных для добычи урана методом подземного выщелачивания (ПВ). В качестве одного из эффективных методов картирования, осуществляемого в экспрессном полевом варианте, на объектах, разрабатываемых АО «Хиагда» был протестирован изотопный эманационный метод с определением короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР) радона (^{222}Rn). Постановка опытно-методических работ (ОМР) осуществлялась в пределах Хиагдинского разлома, положение которого в настоящее время хорошо изучено. В металлогеническом отношении район проведения ОМР представляет собой группу сближенных мелких экзогенно-эпигенетических месторождений, локализованных под плато-базальтами в миоцен-плиоценовых проницаемых обводненных отложениях палеодолин, врезанных в кристаллический фундамент [19]. Палеодолины располагаются на склонах поднятия, осложненных региональными разломами восток-северо-восточного простирания сбросо-сдвигового типа с вертикальной амплитудой движений до 100 м.

2. При производстве редких металлов (к ним также относятся редкоземельные металлы и уран) в сферу жизнедеятельности человека поступает колоссальный объем материалов с повышенным содержанием природных радионуклидов (ПРН), что приводит к следующим негативным последствиям: 1) создаются высокие дозовые нагрузки на персонал производственных предприятий и, в некоторых случаях, на население на близлежащих территориях; 2) при обращении с такими материалами возникают дополнительные издержки, связанные с необходимостью обеспечения безопасных условий работы персонала и защиты окружающей среды. Минеральное сырье и продукты его переработки с повышенным содержанием радионуклидов подлежат радиационному контролю (РК) и категорированию, и здесь имеется ряд проблем, связанных с возможным и, в ряде случаев, типичным отсутствием радиоактивного равновесия между родоначальниками рядов радиоактивного распада (^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th) и их ДПР, активности которых обычно определяют инструментальным гамма-спектрометрическим методом. В горных породах и рудах равновесие между радионуклидами наблюдается не всегда: в частности, для урановых руд разного возраста и происхождения характерны вариации отношений активностей изотопов U, Th и Ra в диапазоне 0,4–2 [3, 4]. При переработке минерального сырья как правило идет перераспределение ПРН с разными химическими и ядерно-физическими свойствами, в результате которого в отдельных получаемых материалах (рудных концентратах, отходах и др.) могут концентрироваться высоко активные радиоизотопы; коэффициенты техногенного концентрирования ПРН существенно выше, чем для природных аномалий. В этих случаях наибольший риск для персонала предприятий и населения связан с газообразными ^{222}Rn и ^{220}Rn, высокотоксичными изотопами ^{210}Po, ^{210}Pb и Ra. Урановые руды являются источником TENORM (материалов с технологически увеличенной радиоактивностью) с суммарной удельной активностью (УА) ПРН на уровне (1,1–11) • 10^4 Бк/кг; отходы добычи монацитовых, ксенотимовых и бастнезитовых руд характеризуются УА ПРН от 210 до 1,2 • 10^5 Бк/кг, а отходы передела циркониевых руд – (0,3–4,8) • 10^4

Бк/кг [14]. Дезактивация перовскитового, лопаритового, эвдиалитового, сфенового, колумбитового, пирохлорового и других концентратов при производстве тантала, ниобия и редких земель дает радиоактивные кеки, а пирометаллургический передел концентратов с получением слабоактивных товарных продуктов – шлаки с УА ПРН порядка 10^5 Бк/кг [15]. В связи с этим при извлечении редкоземельных металлов предпочтение отдается бастнезитовым рудам с низким содержанием урана [21].

При РК резкое смещение равновесия между ПРН в продуктах передела имеет принципиальное значение. Согласно санитарно-гигиеническому законодательству РФ в зависимости от эффективной удельной активности Аэфф радионуклидов в минеральном сырье и материалах их разделяют на 4 класса, для которых предусмотрены различные правила обращения [17, 18]. Расчет Аэфф выполняется по формуле: $A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3 \bullet A_{Th} + 0,09 \bullet A_K$ (1), где A_{Ra}, A_{Th} и A_K – соответственно УА ^{226}Ra, ^{232}Th и ^{40}K (Бк) при условии равновесия в рядах распада U и Th.

Категоризация производственных отходов по радиационной опасности выполняется по значениям $A_{эфф}$ в зависимости от наличия равновесия в рядах распада ^{238}U и ^{232}Th. При условии равновесия для расчета используется формула (1), иначе рекомендуется определять $A_{эфф}$ с учетом вклада отдельных гамма-излучающих РН. Как типичные случаи нарушения равновесия в [17] рассматриваются: 1) селективное поступление в отходы изотопов радия; 2) интенсивное эманирование. Для первого случая при отсутствии ^{238}U и ^{232}Th получают значение $A_{эфф} = A_{Ra\text{-}226} + 1,3 \bullet k \bullet A_{Ra\text{-}228} + 0,09 \bullet A_K$ (2), где $A_{Ra\text{-}226}$, $A_{Ra\text{-}228}$ и A_K – соответственно УА ^{226}Ra, ^{228}Ra и ^{40}K (Бк), k – коэффициент, учитывающий длительность периода накопления радионуклидов в отходах и время хранения отходов. Если для отходов не установлены периоды хранения и накопления радионуклидов, то принимается k = 1,3, если период накопления превышает 5 лет, а время хранения отходов превышает 6 лет, то считают $A_{эфф} = A_{Ra\text{-}226} + 1,7 \bullet A_{Ra\text{-}228} + 0,09 \bullet A_K$ (3). При нарушении радиоактивного равновесия в ряду ^{238}U из-за высокого коэффициента эманирования ^{222}Rn ($К_{эм}$ > 10 %) для расчета $A_{эфф}$ рекомендуется использовать формулу: $A_{эфф} = (1 – К_{эм}) \bullet A_{Ra} + 1,3 \bullet A_{Th} + 0,09 \bullet A_K$ (4); коэффициент эманирования может рассчитан как: $К_{эм} = (A_{Ra} – A_{ДПР})/A_{Ra}$, A_{Ra} – УА ^{226}Ra (без ДПР); $A_{ДПР}$ – УА одного из гамма-излучающих ДПР ^{226}Ra. Если в отходах нет равновесия в ряду ^{232}Th и идет эманирование ^{222}Rn, то считают $A_{эфф} = (1 – К_{эм}) \bullet A_{Ra\text{-}226} + 1,3 \bullet k \bullet A_{Ra\text{-}228} + 0,09 \bullet A_K$ (5). При других видах нарушения радиоактивного равновесия в рядах ^{238}U и ^{232}Th в отходах значение $A_{эфф}$ в каждом конкретном случае должно определяться с учетом характера нарушения равновесия.

Такой подход к оценке минерального сырья и материалов имеет следующие недостатки: 1) формулы (1–5) учитывают только присутствие гамма-излучающих радионуклидов (т. е. высокотоксичные альфа- и бета-излучатели из рядов распада U и Th как потенциальная опасность для человека не рассматриваются); 2) проверка на радиоактивное равновесие на практике обычно не выполняется, т. е. корректность получения $A_{эфф}$ не подтверждена (при оценке продуктов переработки с высокими активностями короткоживущих радиоизотопов это принципиально важно). Вызывает вопрос и введение поправки на эманирование радийсодержащих отходов, выражающееся в фактическом уменьшении расчетного значения $A_{эфф}$ согласно (4, 5), т. е., как ни странно, активное эманирование отходов «ведет» к снижению связанной с ними радиационной опасности. Такой подход сомнителен, если выход радона из отходов затруднен (например, при гуртовании, герметизации и т. п.) и в них накапливаются гамма-излучающие ДПР ^{222}Rn с удельной активностью, намного превышающей УА ^{226}Ra (соответственно вырастут и дозы облучения персонала). Кроме того, измерение УА ^{226}Ra по низкоинтенсивной гамма-линии 186,2 кэВ не всегда возможно в связи с наложением гамма-излучения ^{235}U (линия 185,7 кэВ).

Для решения этих проблем может быть предложен комплекс спектрорадиометрических методов (методик), в том числе с радиохимической подготовкой, позволяющий определять индивидуальные активности основных дозообразующих радиоизотопов в редкометалльных (редкоземельных) рудах и продуктах их переработки, что показано на примере анализа и оценки руд редкометалльно-редкоземельных Томторского и Зашихинского месторождений, проведенных в рамках бюджетного контракта.

3. Для обеспечения радиационной безопасности населения при потреблении питьевой воды установлены ограничения по содержанию природных и техногенных радионуклидов в источниках питьевого водоснабжения. Для оптимизации РК проводится предварительная оценка качества питьевой воды по удельной общей (суммарной) альфа- и бета-активности: если измеренные значения оценочных показателей не превышают эмпирически установленных уровней 0,2 и 1,0 Бк/кг, соответственно, то дальнейшие исследования воды не обязательны [17, 18, 16]. Простота и эффективность этого подхода к РК воды, к сожалению, находится в противоречии с многочисленными осложняющими «нюансами», относящимися как к методологии исследований, так и к их практической реализации в рамках законодательства по обеспечению единства измерений. Одна из проблем связана с тем, что радионуклидный состав природных вод исключительно разнообразен: активности радиоизотопов варьируют в очень широком диапазоне, равновесие между ними, как правило, не соблюдается, обычно в природных водах преобладают короткоживущие ДПР ^{238}U и ^{232}Th, активность

которых падает с течением времени. Учесть эти факторы при определении общих (суммарных) показателей активности затруднительно, так как стандарты сравнения, по которым фактически определяются активности в большинстве методик, принципиально не могут соответствовать всем возможным вариациям радионуклидного и химического состава анализируемых вод, а временные интервалы пробоподготовки и измерений чаще всего установлены только приблизительно [13]. Частным, но достаточно распространенным и показательным, случаем этой системы является уменьшающаяся во времени общая альфа-активность природных вод, обусловленная присутствием ^{224}Ra, не «поддержанного» равновесными количествами ^{228}Ra и ^{228}Th.

Материалы и методы

1. ОМР осуществлялись по пройденным профилям вдоль рудоносных палеодолин Хиагдинская-3 и Хиагдинская-5, пересекающих Хиагдинский разлом, и включающих залежи № 3 и № 5 Хиагдинского месторождения. Опробование включало два экспрессных метода: 1) «традиционный» способ активного налета (САН); 2) способ, включающий сорбирование радона на активированном угле.

В первом случае на точках опробования осуществлялось суточное экспонирование тонких полимерных пленок, используемых в качестве коллекторов для сбора ДПР радона, в неглубоких вертикальных шпурах. Сразу после извлечения пленок с накопившимся ДПР ^{222}Rn – альфа-излучающим изотопом ^{218}Po ($T_{1/2}$ = 3,098 мин.), пришедшим в равновесие с материнским ^{222}Rn в подпочвенном газе, выполнялись измерения общей альфа-активности пленок с помощью альфа-радиометра, изготовленного НТЦ «Радэк», на основе сцинтилляционного ZnS(Ag)-детектора.

Во втором случае на тех же точках в течение трех суток экспонировали объемные коллекторы радона на основе активированного угля – высокоэффективного природного сорбента газов. После извлечения коллекторов в условиях полевой лаборатории проводили определение активности подпочвенного ^{222}Rn по равновесным активностям его относительно короткоживущих гамма-излучающих ДПР ^{214}Pb ($T_{1/2}$ = 27,06 мин.) и ^{214}Bi ($T_{1/2}$ = 19,9 мин.), измеренным на гамма-спектрометре НТЦ «Радэк» со сцинтилляционным NaI(Tl)-детектором (63 × 63 мм). Кроме эманационной съемки на профилях проводилось «стандартное» радиометрическое опробование в почвенных шпурах с использованием радиометра СРП-88П.

2. В лаборатории изотопных методов ФГБУ «ВИМС» проведены радиоизотопные исследования руд Томторского и Зашихинского месторождений, содержащих в качестве основных полезных компонентов ниобий и редкие земли, и продуктов переработки. Исследования выполнялись инструментальным гамма-спектрометрическим, альфа-бета-радиометрическим и альфа-спектрометрическим методами с радиохимической подготовкой согласно специально разработанным и аттестованным методикам измерений [5–8] (неопределенность измерений ≤ 3 0 % отн. при P = 0,95). При измерениях использована аппаратура: спектрометры «Ortec-65195-P/DSPecPlus» и «OrtecOctete/Ocpl-U0600-PPS230» (США), альфа-бета-радиометр «УМФ-2000» (ООО «НТЦ «Доза»). Изотопный анализ образцов руд и продуктов их передела, а также расчеты Аэфф выполнялись сразу после получения образцов из технологического подразделения ФГБУ «ВИМС».

3. Анализ вод на ^{224}Ra, не входящий в «приоритетный» перечень радионуклидов, для большинства водоисточников не выполняется, так как постоянное количество ^{224}Ra в воде обычно поддерживается за счет его образования из ^{228}Ra (^{228}Th), а ограничивающий норматив — уровень вмешательства (УВ) для него достаточно высок (2,1 Бк/кг). Однако, известны воды с преобладанием более короткоживущего изотопа, в которых отношение ^{224}Ra/^{228}Ra выше 1 (количества ^{228}Th в водах обычно очень малы в связи с гидролизом и выпадением нерастворимых соединений тория). В этом случае за счет распада «избыточного» ^{224}Ra общая (суммарная) альфа-активность отобранных проб будет снижаться в соответствии с его периодом полураспада ($T_{1/2}$ = 3,63 сут), т. е. примерно вдвое каждые 4 суток. В зависимости от времени выполнения исследований может быть замечено несоответствие общей альфа-активности воды (чаще всего она превышает контрольный уровень 0,2 Бк/кг) и суммы индивидуальных УА альфа-излучающих радионуклидов в этой же воде. Для разрешения подобных противоречий, после выполнения радионуклидного анализа водных проб, рекомендуется выполнить повторное определение общей альфа-активности пробы, а также рассчитать суммарные активности альфа-излучающих радионуклидов с учетом цепочек образующихся ДПР.

Лабораторией изотопных методов ФГБУ «ВИМС» разработан комплекс радиоизотопных методов для определения оценочных показателей общих (суммарных) активностей в пробах природных вод и УА ^{238}U, ^{234}U, ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{210}Po, ^{210}Pb и других радионуклидов, который используется как в самой лаборатории, так и во многих других организациях. Методы [9, 10] использованы для количественного определения УА ^{226}Ra, ^{228}Ra (неопределенность измерений ≤ 30 % отн. при P = 0,95), а также оценки УА ^{224}Ra; при измерениях используются гамма-спектрометр «Ortec-65195-P/DSPecPlus» (США) и альфа-бета-радиометр «УМФ-2000» (ООО «НТЦ «Доза»). Методика [10] с альфа-бета-радиометрическим окончанием позволяет определять активности изотопов радия в более короткие сроки (около 2 недель).

Результаты и их обсуждение

1. В пределах промплощадок выявлены места разливов продуктивных растворов, фиксируемые по многочисленным аномалиям ДПР ^{222}Rn и по данным шпуровой гамма-радиометрии. Поверхностные техногенные аномалии накладываются на глубинный геохимический сигнал, усложняя интерпретацию данных для отдельных участков опробования. На участке залежи № 5 Хиагдинского месторождения по профилям I, II и II, расположенным на расстоянии 100 м друг от друга (рис. 1), двумя эманационными методами уверенно обнаруживается система тектонических нарушений (рис. 2, 3). Полученные данные пространственно коррелируют с результатами резонансно-акустического профилирования, полученными В. В. Бединовым [2]. На участке залежи № 3 Хиагдинский разлом фиксируется более узкой аномалией, чем в районе залежи № 5, что может свидетельствовать о меньшем количестве оперяющих разломов. Аномалии гамма-излучающих ДПР ^{222}Rn являются более контрастными по сравнению с аномалиями САН. Преимущества этого метода заключаются в устранении влияния краткосрочных вариаций эманационного поля радона (например, связанных с выпадением осадков, суточных вариаций и т. п.) за счет более длительной экспозиции; кроме того, так как угольные коллекторы сорбируют радон ($T_{1/2}$ = 3,82 сут), то необходимость выполнения измерений его активности непосредственно на точках отбора отсутствует.

2. Анализ гамма-спектрометрических данных показывает, что при переработке томторских руд происходит концентрирование изотопов радия, особенно короткоживущих (табл. 1), в продуктах передела. Коэффициенты концентрирования ^{226}Ra варьируют от 3,3 (рудный концентрат) до 5,9 (кек), ^{228}Ra – от 5,6 (концентрат) до 35 (кек). В хвостах и концентратах ^{228}Ra и ^{224}Ra остаются равновесными, в кеках после вскрытия руды происходит разделение изотопов, по-видимому, обусловленное отделением тория (^{224}Ra является ДПР ^{228}Th). УА ^{228}Ra в кеках достигала 5,7 • 10^4 Бк/кг. Так как в пробах преобладают изотопы радия, то расчет параметра $A_{эфф}$ должен выполняться согласно формуле (2) или, при значительном времени накопления радионуклидов и хранения материалов, по формуле (3), что приведет к значительному увеличению $A_{эфф}$ в сравнении с результатами, полученными по формуле (1), что иллюстрируется данными табл. 1. Для радиоактивного кека после вскрытия томторской руды (проба ТБ-2) эффективная активность составит 6,2 • 10^4 Бк/кг с учетом неравновесия ^{228}Ra и ^{232}Th. Таким образом, что способ определения $A_{эфф}$ непосредственно влияет на категоризацию и дальнейшее обращение с продуктами передела.

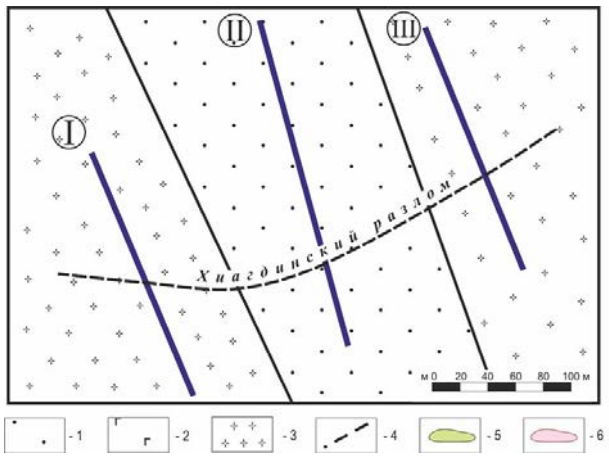


Рис. 1. Фрагмент плана расположения опытных профилей на участке залежи № 5

1 – неогеновые осадочные образования; 2 – неогеновые базальты; 3 – гранитоиды витимканского интрузивного комплекса; 4 – тектонические нарушения; 5 – урановое оруденение с содержанием > 0,01 % и метропроцентом < 0,75; 6 – урановое оруденение с содержанием > 0,01 % и метропроцентом > 0,75 [2].

При переработке руд Зашихинского месторождения рудный концентрат обогащается почти всеми ПРН (за исключением ^{40}K), минимальный коэффициент концентрирования у ^{210}Po (11), максимальный – у ^{232}Th (35); в хвостах сепарации по сравнению с исходной рудой активности ПРН снижаются (за исключением ^{230}Th) (табл. 2). Чистые оксиды и соли редкоземельных металлов могут селективно обогащаться короткоживущими ПРН из ряда ^{235}U: для одной из проб оксидов получена УА ^{227}Th 4,3 • 10^4 Бк/кг (в исходном сырье активности этих радионуклидов пренебрежимо малы).

Инструментальная гамма-спектрометрия во многих случаях не позволяет достоверно установить изотопные отношения в образцах, особенно при существенном преобладании изотопов ряда тория (типично для руд РЗМ), и получить надежные значения $A_{эфф.}$ То же касается индивидуальных активностей радионуклидов: на практике УА ^{238}U часто принимают равной УА ^{226}Ra. Другим способом определения ^{238}U является измерение гамма-излучения короткоживущего ^{234m}Pa. Однако для продуктов передела равновесие ^{234}Th (^{234m}Pa) и ^{238}U может не соблюдаться, а выдержка проб в течение 3–4 месяцев для его достижения неприемлема с точки зрения целей РК. Анализ ^{234}Th (^{234m}Pa) в рудах должен апробироваться на конкретных объектах, так как подвержен влиянию вариаций насыпной плотности проб (образцов), их элементного состава и др., а предел определения метода достаточно велик. Имеются сложности определения активности ^{226}Ra по его собственной гамма-линии 186,2 кэВ, связанные с низким выходом гамма-квантов (3,53 %) и наложением излучения ^{235}U (185,7 кэВ). Определение ^{226}Ra «стандартным» способом по ДПР ^{214}Pb и ^{214}Bi осложняется интенсивным эманированием слабосвязанных (рыхлых) проб, на-

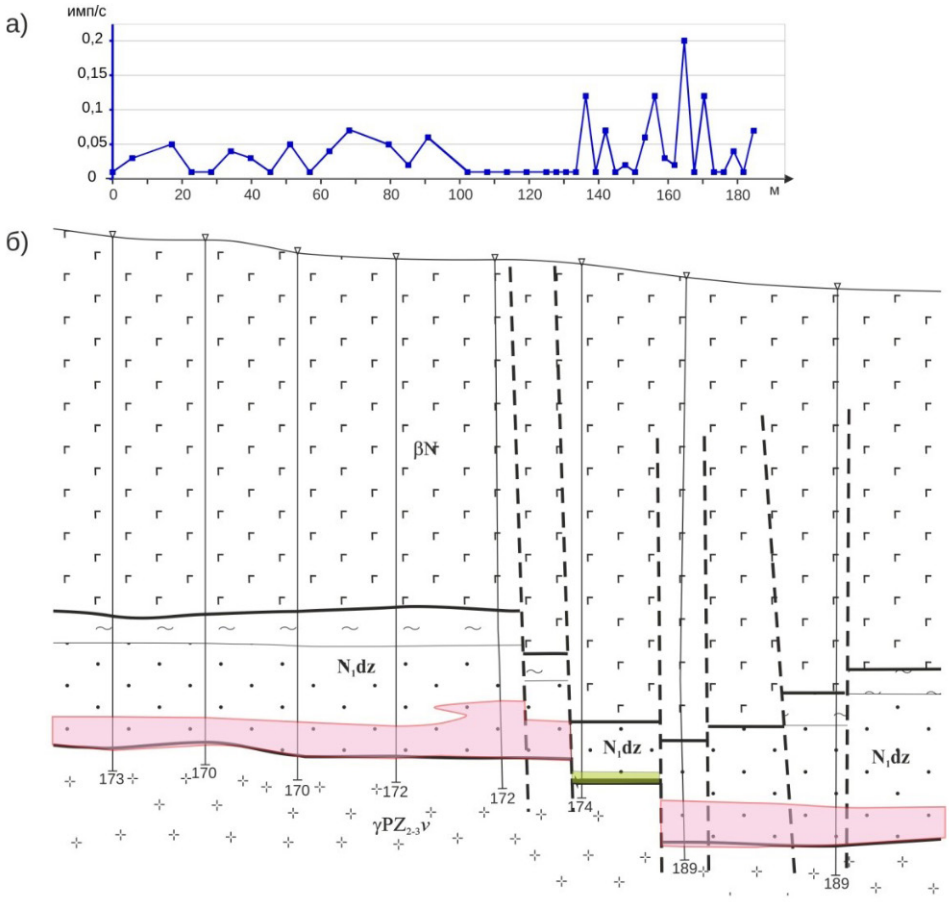


Рис. 2. Результаты САН (а) и фрагмент геологического разреза (б) по профилю II (центральная часть залежи № 5)

Условные обозначения: см. рис. 1.

Таблица 1. Удельные активности ПРН (Бк/кг) в рудах Томторского месторождения и продуктах их переработки (по данным гамма-спектрометрии)

Пробы	^{226}Ra	^{228}Ra	^{224}Ra	^{40}K	$A_{эфф}$, 10^{4} (а)
Исходная руда (Северный участок)	240	1660	1650	≤ 50	0,24
ТББ-3/1, концентрат обогащения № 1	782	9360	8840	≤ 50	1,3 • (1,7)
ТББ-3/2, концентрат обогащения № 2	832	9360	8680	≤ 50	1,3 • (1,7)
ТББ-3/3, концентрат обогащения № 3	865	9780	9460	≤ 50	1,4 (1,7)
ТББ-3/4, хвосты	1200	10600	11000	≤ 50	1,5

(а) приведены значения, полученные по формуле (1), в скобках – по формуле (3)

пример, переотложенных карбонатитовых руд, отходов и др., поэтому нужны их герметизация и длительная выдержка.

В международной практике гамма-спектрометрический анализ радиоактивных материалов используется преимущественно на объектах, где уже установлено радиоактивное равновесие между ПРН. Применение альтернативных гамма-активационного и масс-спектрометрического методов не всегда возможно в связи с недоступностью оборудования и, в случае масс-спектрометрии, из-за высоких пределов определения короткоживущих ПРН. Оптимальным выбором для рядовых лабораторий будут спектрорадиометрические методы с радиохимической подготовкой проб, позволяющие выделять ключевые группы изотопов и устанавливать их индивидуальные активности. Этот подход в большей мере согласуется с правилами оценки материалов с природной радиоактивностью, принятыми за рубежом [20], и предусматривающими определение более широкого круга ПРН, в т. ч. ^{210}Pb, ^{230}Th и др.

3. Анализ пробы воды, отобранной из скважины хозяйственно-питьевого водоснабжения в Пушкинском районе Московской обл., показал, что общая альфа-активность, превышающая контрольный уро-

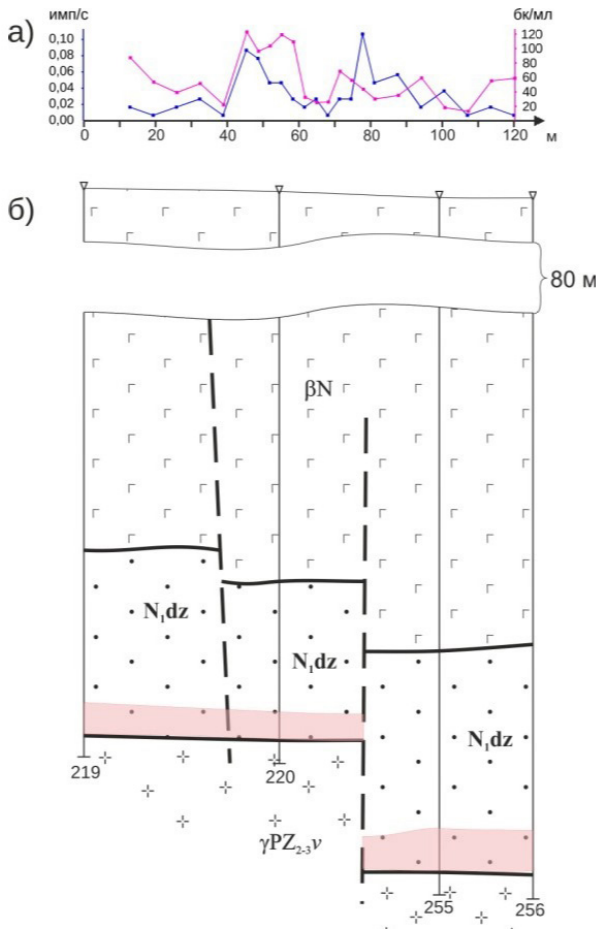


Рис. 3. Результаты САН (а), имп/с, измерения активности ^{214}Pb и ^{214}Bi в угольных коллекторах (а), Бк/мл и фрагмент геологического разреза (б) по профилю I (центральная часть залежи № 3)

Условные обозначения: см. рис. 1.

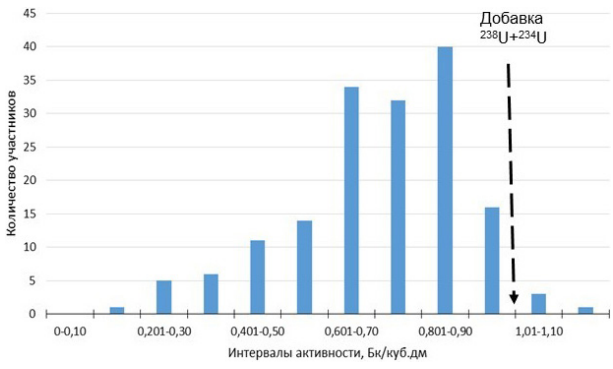


Рис. 4. Распределение результатов межлабораторных сличений (2015 г.) по определению общей (суммарной) альфа-активности водных проб, содержащих добавку равновесного урана с общей активностью ^{238}U и ^{234}U на уровне 1 Бк/дм^3

Таблица 2. Удельные активности ПРН (Бк/кг) в рудах Зашихинского месторождения и продуктах их переработки

ПРН	Руда (№ 3-1)	Хвосты сепарации (№ 3-хгс-1)	Концентрат Ta–Nb (№ 3-к-1)
^{238}U	186	104	4504
^{234}U	179	87	4527
^{232}Th	2592	1391	8680
^{228}Th	2166	1367	4100
^{230}Th	166	288	4552
^{210}Po	230	104	2532
^{210}Pb	247	182	2937
^{226}Ra	172	105	3348
^{40}K	622	594	≤ 70

вень 0,2 Бк/кг, уменьшается с течением времени, а индивидуальные УА альфа-излучающих радионуклидов из приоритетного списка (^{238}U, ^{234}U, ^{226}Ra, ^{210}Po) по сравнению с ней очень малы (табл. 3). В методике [11] в качестве стандарта (образца) сравнения используется препарат, содержащий изотопы плутония со средневзвешенной энергией альфа-излучения 5,2 МэВ, и несоответствие энергетических спектров радионуклидов в пробе и стандарте (табл. 4) вызывает закономерное завышение результата измерений общей альфа-активности (примерно на 75% при разнице во средневзвешенных энергиях альфа-излучения $\Delta_{E\alpha}$ = 1 МэВ [1]). Таким образом, при $\Delta_{E\alpha}$ = 1,4 МэВ измеренная общая альфа-активность ^{224}Ra и его ДПР составит примерно 0,24 Бк/кг при расчетной сумме УА радионуклидов 0,12 Бк/кг. Противоположный эффект возникает при меньшей средневзвешенной энергии альфа-излучения пробы по сравнению с используемым стандартом сравнения, например, когда основная доля активности пробы формируется природным ураном. Так как в других методиках с выпариванием водных проб или соосаждением радионуклидов на носителе предусмотрено использование разных стандартов сравнения с теми или иными радионуклидами, то при межлабораторных сличениях наблюдается общее занижение результатов анализа общей альфа-активности урансодержащих проб с бимодальным характером распределения результатов [12] (рис. 4). Таким образом, стандартизация измерений общей (суммарной) активности не вполне согласуется с целью этих измерений – получению достоверных результатов для оценки радиационной опасности объекта контроля (при получении заниженных результатов могут быть пропущены радиационно-опасные источники, получение завышенных результатов невыгодно экономически). Еще одним трудно регулируемым фактором является возможное эманирование торона (^{220}Rn) из материала счет-

Таблица 3. Результаты анализа пробы воды, отобранной из скважины хозяйственно-питьевого назначения в Пушкинском районе Московской обл.

Показатель	Измеренные значения, Бк/кг	УВ, Бк/кг
Общая (суммарная) альфа-активность	0,48 (06.05.2017) 0,42 (11.05.2017) 0,35 (16.05.2017)	0,2
Общая (суммарная) бета-активность	0,35 (06.05.2017) 0,38 (11.05.2017) 0,39 (16.05.2017)	1,0
УА ^{238}U	≤ 0,01	3,00
УА ^{234}U	≤ 0,01	2,80
УА ^{210}Po	0,11	0,11
УА ^{210}Pb (бета-излучатель)	≤ 0,03	0,20
УА ^{226}Ra	≤ 0,05	0,49
УА ^{228}Ra (бета-излучатель)	0,06 (04.05.2017) 0,07 (05.05.2017)	0,20
УА ^{224}Ra	0,03 (04.05.2017) 0,02 (05.05.2017)	2,1

Таблица 4. Средневзвешенная энергия альфа-излучения ^{224}Ra и его ДПР, расчетное значение их суммарной активности

Радионуклиды (РН)	Энергия альфа-излучения РН	Средневзвешенная энергия РН	Расчетное значение суммарной активности РН
^{224}Ra	5789 кэВ	6,6 МэВ	0,12 Бк/кг (при условии равновесия ^{224}Ra и его ДПР)
^{220}Rn	6405 кэВ		
^{216}Po	6906 кэВ		
^{212}Bi (выход: 0,36)	6207 кэВ		
^{212}Po (выход: 0,64)	8954 кэВ		

ного образца в пространство между поверхностью образца и детектором, так как при оседании заряженных ДПР ^{220}Rn на поверхности детектора происходит резкий рост «кажущейся» эффективности регистрации их альфа-излучения, обусловливающий еще большее завышение результата измерений. Для уменьшения воздействия эманирования концентрат водных проб обычно сульфатируют.

Заключение

1. Протестированные экспрессные полевые методы позволяют локализовать положение крупных и оперяющих тектонических нарушений и могут быть рекомендованы для решения подобных геологических задач.

2. Лабораторными радиоизотопными исследованиями установлено селективное концентрирование групп ПРН в продуктах переработки редкометалльно-редкоземельных руд, выражающееся в характерном резком смещении радиоактивного равновесия между членами рядов радиоактивного распада урана и тория, что должно учитываться при РК с определением $A_{эфф}$. Для оценки и категорирования таких материалов оправдано использование спектрорадиометрических методов с радиохимической подготовкой.

3. При анализе радийсодержащих природных вод следует учитывать возможное присутствие ^{224}Ra и его ДПР, в этом случае рекомендуется повторное определение общей (суммарной) активности через 2–3 недели после отбора проб. Оценить активность ^{224}Ra также можно с использованием методик [9, 10].

Авторы благодарны коллективу АО «Хиагда» за помощь в организации опытно-методических работ по картированию разрывных тектонических нарушений, а также директору НТЦ «РАДЭК» Ф. Н. Шикаленко за предоставленное полевое оборудование.

Литература

1. Бахур А. Е. Научно-методические основы радиоэкологической оценки геологической среды: диссертация на соискание уч. ст. доктора геол.-мин. наук. – Москва, 2008.
2. Бединов В. В., Прохоров Д. А., Стародубов А. В. Результаты опытно-методических работ по выявлению и картированию тектонических нарушений на урановых месторождениях палеодолинного типа методами эманационной съемки и РАП // Инженерная и рудная геофизика, 2020. – Пермь, Россия. – 12–16 мая 2020 г.
3. Вальтер А. А., Дикий Н. П., Довбня А. Н. и др. Ядерно-физическое исследование радиоактивного равновесия в древних урановых рудах Украины, 2009. URL: http://dspace.nbuv.gov.ua (дата обращения: 19.03.2021).
4. Домаренко В. А., Краморенко С. В., Чернев Е. М. Поведение урана и радия при формировании руд месторождения Дыбрын (Витимский урановорудный район, Республика Бурятия), 2014. URL: https://www.sibsiu.ru (дата обращения: 19.03.2021).
5. Методика измерений удельной активности альфа-бета-излучающих изотопов ^{210}Po, ^{210}Pb, в рудах редких и редкоземельных металлов альфа-бета-радиометрическим (альфа-спектрометрическим) методом с радиохимической подготовкой (ФР.1.31.2017.25728). – М.: ФГБУ «ВИМС», 2016.
6. Методика измерений удельной активности альфа-излучающих изотопов ^{232}Th, ^{230}Th, ^{228}Th, ^{227}Th в рудах редких и редкоземельных металлов альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой (ФР.1.40.2017.25718). – М.: ФГБУ «ВИМС», 2016.
7. Методика измерений удельной активности альфа-излучающих изотопов ^{238}U, ^{235}U, ^{234}U в рудах редких и редкоземельных металлов альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой (ФР.1.40.2017.25716). – М.: ФГБУ «ВИМС», 2016.
8. Методика измерений удельной активности ^{238}U, ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{224}Ra, ^{40}K, ^{138}La в рудах редких и редкоземельных металлов гамма-спектрометрическим методом (ФР.1.40.2017.25714). – М.: ФГБУ «ВИМС», 2016.
9. Методика измерений объемной активности изотопов радия (^{226}Ra, ^{228}Ra) в пробах природных (пресных и минерализованных), технологических и сточных вод гамма-спектрометрическим методом с предварительным концентрированием (ФР.1.40.2013.15397). – М.: ФГБУ «ВИМС», 2013.
10. Методика измерений объемной активности изотопов радия (^{226}Ra, ^{228}Ra) в пробах природных вод альфа-бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой (ФР.1.40.2013.15385). – М.: ФГБУ «ВИМС», 2013.
11. Методика измерений общей (суммарной) альфа- и бета-активности в пробах объектов окружающей среды и технологических сред (после их предварительной подготовки) с использованием низкофоновых альфа-бета-радиометров (ФР.1.40.2018.31581). – М.: ФГБУ «ВИМС», 2018.
12. Овсянникова Т. М., Бахур А. Е., Тутельян О. Е., Кувшинников С. И. Анализ результатов межлабораторных сравнительных испытаний 2014 года по измерениям суммарных альфа- и бета-активностей в питьевых водах // АНРИ, 2015. – № 2 (81). – С. 2–7.
13. Овсянникова Т. М. Радиационный контроль питьевых вод: нормирование и методы определения суммарных активностей (мировой опыт и тенденции) // АНРИ, 2011. – № 2 (65). – С. 2–15.
14. Овсянникова Т. М. Радиоактивность редкометалльных руд и продуктов их передела: уровни, нормирование и контроль // Материалы по геологии, поискам и разведке месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. Информационный сборник, выпуск 160. – М.: РИС ВИМС, 2017. – С. 167–172.
15. Россман Г. И., Бахур А. Е., Петрова Н. В. Промышленная радиационная экология минерального сырья // Минеральное сырье, 2012. – № 25. – С. 236–237.
16. СанПиН 2.6.1.2523-09 (Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009), 2010.
17. СанПиН 2.6.1.2800-10 «Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения», 2010.
18. СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010), 2010.
19. Тарханова Г. А., Прохоров Д. А. Генетические особенности формирования уранового оруденения «витимского» типа // Разведка и охрана недр, 2017. – № 11. – С. 47–59.
20. Management of NORM Residues / IAEA-TECDOC-1712 / International atomic energy agency Vienna, 2013. URL: https://www-pub.iaea.org (дата обращения: 19.03.2021).
21. Ragheb M. Thorium resources in rare earth elements. URL: https://mragheb.com (дата обращения: 19.03.2021).

ИСТОРИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРОБЛЕМЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ ЕНИСЕЙСКОГО УЧАСТКА ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

А. Ю. Озерский, Е. Г. Полякова

АО «Красноярская горно-геологическая компания»
Красноярск, Россия, ozerski@krasgeo.ru

HISTORY, RESULTS, AND PROBLEMS OF THE GEOLOGICAL INVESTIGATION OF THE YENISSEYSKIY SITE FOR RADIO-ACTIVE WASTE DISPOSAL

Andrey Ozerskiy, Elena Polyakova

Krasnoyarsk Mining Geological Co.
Krasnoyarsk, Russia, ozerski@krasgeo.ru

The Yenisseisky Site was explored in the Archean gneisses in the southern part of the Yenisseisky ridge (Siberian Craton). The history of the study of this site and its main geological re-sults are considered. Principal problems for further research are shown.

Введение. В 2011 году вступил в силу Федеральный закон Российской Федерации № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами…», согласно которому «радиоактивные отходы… подлежат обязательному захоронению в пунктах захоронения радиоактивных отходов» [8]. Принятие этого Федерального закона придало новый импульс геологическому изучению Енисейского участка, расположенного в пределах закрытого административно-территориального образования (ЗАТО) г. Железногорска, примерно в 50 км северо-восточнее Красноярска. Этот участок был выявлен в результате многолетних геологических исследований, проводившихся в районе Нижне-Канского гранитоидного массива, представляющего собой практически безрудный рифейский батолит, площадью свыше 1 500 км^2 (рис. 1). Большие размеры и ожидаемые изолирующие свойства пород массива привлекли внимание специалистов научных и проектных организаций Минатома, по мнению которых в недрах этой структуры могло быть захоронено большое количество твердых радиоактивных отходов (РАО).

Сначала исследования проводились внутри территории Нижне-Канского массива (НКМ), но затем они перешли и на участки его складчатого обрамления. В пределах изученной территории исследователи выделили пять перспективных участков с наименьшими проявлениями дизъюнктивных нарушений. Детализирующие работы показали, что гранитоиды НКМ характеризуются повышенной трещиноватостью, недостаточными размерами монолитных блоков пород, их невысокими сорбционными свойствами, а также некоторыми другими несоответствиями требованиям Минатома (с 2007 г. – Росатома).

Участок Енисейский, расположенный вне пределов НКМ (рис. 1), вначале рассматривался как альтернативный перспективному «гранитному» участку Верхнеитатскому. Однако, по результатам предварительных геолого-геофизических работ, именно Енисейский участок приобрел приоритетное значение. Поскольку этот участок изучался по общей программе исследования НКМ, он до сих пор в документах Росатома записывается как «участок Енисейский Нижне-Канского массива». При этом почти все специалисты осознают, что участок не принадлежит к геологической структуре НКМ, однако определение «участок Енисейский Нижне-Канского массива» продолжает использоваться в Росатоме как сложившееся привычное наименование, используемое в официальных документах.

Настоящая статья посвящена Енисейскому участку, вопросы изучения остальных участков, расположенных в пределах НКМ, в ней не рассматриваются.

История изучения. Исследования в районе расположения ФГУП «Горно-химический комбинат» («ГХК») с целью выбора участка для захоронения кондиционированных РАО в пределах НКМ выполнялись с начала 1990-годов. В 1992–2002 гг. под методическим руководством НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» проводись геологические исследования с целью поиска участков, перспективных для захоронения отвержденных отходов проектируемого завода РТ-2 [1, 2]. В результате обширного комплекса геолого-геофизических работ и бурения трех структурно-параметрических скважин, в 2002 году специалисты научных и проектных организаций Минатома выбрали в качестве основного участок Верхнеитатский, а альтернативного – участок Енисейский.

В 2003–2007 гг. под методическим руководством ФГУП «ВНИПИпромтехнологии» проводились предварительные исследования на участках Енисейском и Верхнеитатском с целью выбора площадок для

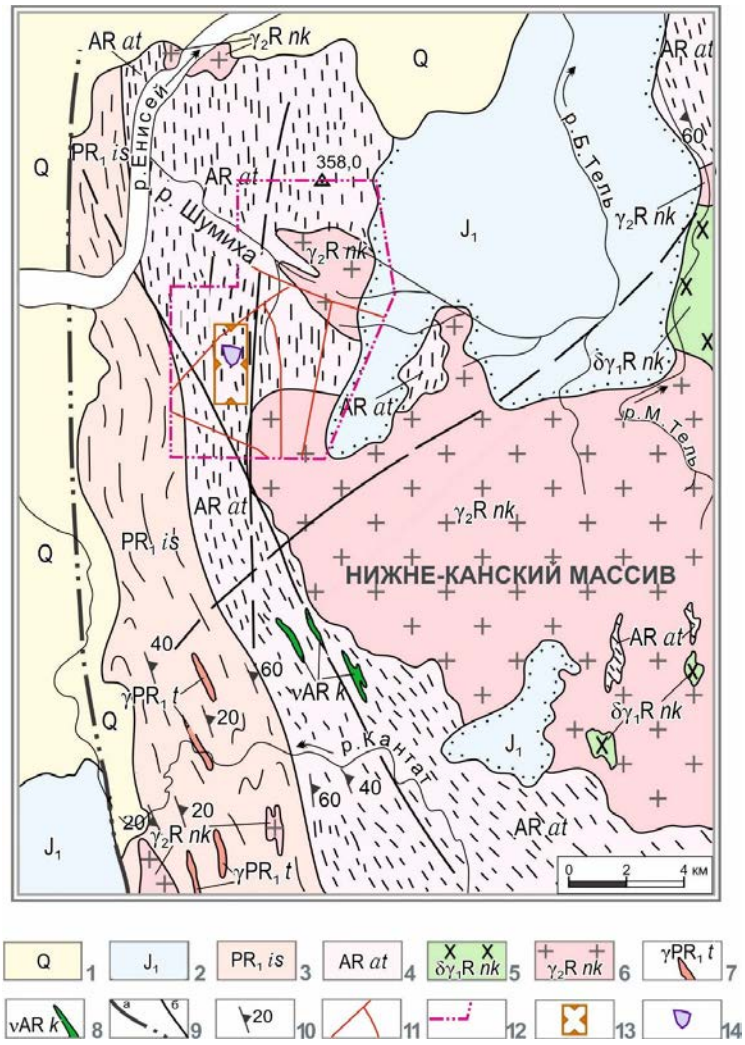


Рис. 1. Схематическая геологическая карта района Енисейского участка. Составил К. А. Заблоцкий по материалам Ю. И. Парфенова

1–8 – геологические подразделения. 1 – четвертичные отложения (Q); 2 – нижнеюрские терригенные угленосные отложения (J_1); 3 – гнейсы и кристаллосланцы исаевской серии (PR_1is); 4 – плагиогнейсы и кристаллосланцы атамановской серии (AR_1at); 5 – диориты и гранодиориты Нижне-Канского массива ($\delta\gamma_1Rnk$); 6 – плагиограниты Нижне-Канского массива (γ_2Rnk); 7 – гранитоиды таракского комплекса (γPR_1t); 8 – габбро кимбирского комплекса архея (νARk). 9–11 – структурные элементы. 9 – разрывные нарушения: главные (а) и второстепенные (б); 10 – элементы залегания гнейсовидной полосчатости; 11 – предполагаемые разрывные нарушения на Енисейском участке, выявленные в 2002–2007 гг. 12–14 – площади исследований и строительства. 12 – граница первоначальной лицензионной площади Енисейского участка по лицензии, выданной в 2006 г. 13 – площадь поисково-оценочных работ 2009–2011 гг. и инженерных изысканий 2013–2014 гг. 14 – лицензионная площадь объекта окончательной изоляции РАО.

дальнейших детальных исследований. В исследованиях приняли участие свыше десятка научных и производственных организаций. Исследования этого периода включали в основном неинвазивные методы: дешифрирование материалов дистанционных съемок, неотектонические исследования, топографо-геодезические работы, геофизические съемки различными методами, площадную гелиевую съемку и др. виды работ. На Енисейском участке была пробурена всего одна глубокая скважина 1-Е, достигшая глубины целевого интервала для планируемого захоронения РАО.

В пределах участка площадью 70 км^2 по результатам проведенных исследований был выявлен устойчивый, относительно однородный блок в центральной части Байкало-Шумихинской площади (к северу от истока руч. Байкал) размерами 2,0 × 2,5 км, который отвечал требованиям НП-055-04 [5] для окончательной изоляции РАО. В этот же период, на основе сравнительной экспертизы результатов работ по участку Енисейскому и по участку Верхнеитатскому (площадки «Итатский» и «Каменный»), был сформулирован вывод о более высокой перспективности для изоляции РАО участка Енисейского [1, 2].

По итогам предварительных геологических исследований ФГУП «ГХК» в 2006 году получило в Управлении по недропользованию по Красноярскому краю лицензию «на геологическое изучение участка Енисейский Нижнеканского массива с целью оценки пригодности для строительства эксплуатации подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых». Лицензионная площадь составила 64,14 км^2, однако в дальнейшем практически все геологоразведочные работы проводились только в пределах упомянутого выше перспективного блока площадью около 6 км^2 (рис. 1).

Существенным недостатком геологических исследований, проводившихся в 1992–2007 гг. был их несистематический характер, не соответствующий требованиям Закона Российской Федерации «О недрах». Лицензии на геологическое изучение недр в эти годы, как правило, не оформлялись, не выполнялась государственная регистрация работ. Исследования выполнялись различными организациями, по самым различным методикам, проекты работ не проходили государственной экспертизы. Наконец, результаты работ не рассматривались государственными органами управления недрами, многочисленные отчеты не были сданы в геологические фонды, поэтому в наши дни часть их безвозвратно утрачена, либо не имеет статуса официальных геологических материалов. Результаты работ на перспективных участках НКМ рассматривались некими экспертами Минатома, не только персоналии, но и уровень компетенции которых и наличие полномочий принимать решения о пригодности участков от имени государства остались неизвестными.

Систематическое изучение участка Енисейский, соответствующее требованиям Закона РФ «О недрах» и нормативных документов Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (МПР РФ), было начато в 2009 году в рамках упомянутой выше лицензии на геологическое изучение недр, выданной ФГУП «ГХК». Соответственно, последний выступал в качестве генерального заказчика и финансировал работы, а методическое руководство осуществляло АО «ВНИПИпромтехнологии», специалисты которого сформулировали основные требования к методике выполнения работ, задали контур подземного объекта, а также принимали участие в контроле над реализацией работ и в обсуждении получаемых результатов. Практическое выполнение работ было поручено акционерному обществу «Красноярская горно-геологическая компания» (АО «Красноярскгеология»), которое располагало необходимыми техническими средствами для бурения разведочных скважин на требуемую глубину изучения (700 м), а также интеллектуальным потенциалом, способным решить поставленные задачи. Проектирование геологоразведочных работ и их практическая реализация выполнялись в соответствии с отечественными и международными требованиями [3, 4, 5, 9, 10]. Согласно требованиями к стадийности геологоразведочных работ, изучение Енисейского участка выполнено в две стадии: поисковую и оценочную, при этом оценочная стадия выполнялась дважды. Результаты всех стадий работ проходили государственную экспертизу в Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых Федерального агентства по недропользованию (ГКЗ Роснедра).

В 2011 году по результатам поисковых и оценочных работ был изучен породный массив площадью 6,2 км^2 с мощностью целевого интервала захоронения РАО 25 м. Кроме АО «Красноярскгеология» в работах приняли участие около десяти научных и производственных организаций. Помимо бурения и комплексного изучения массива в скважинах были также выполнены площадные геофизические работы и инженерно-экологические изыскания.

Во время проведения оценочных работ и рассмотрения отчета в стране произошли существенные изменения в сфере работы с РАО. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 20.03.2012 г. № 384-р статусом национального оператора по обращению с радиоактивными отходами было наделено ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» («НО РАО»). С 2015 года лицензия на пользование недрами участка была переоформлена с ФГУП «ГХК» на ФГУП «НО РАО».

В 2012–2014 гг. на площади участка были проведены проектно-изыскательские работы, генеральным подрядчиком которых было АО «ВНИПИпромтехнологии», а в работах участвовало несколько организаций. Глубокое бурение и дополнительное изучение целевого интервала вновь выполнило АО «Красноярскгеология». Изыскания позволили существенным образом повысить геологическую изученность участка, в связи с чем на основании материалов геологоразведочных работ и инженерных изысканий в ГКЗ в 2015 г. были повторно представлены результаты работ оценочной стадии для целевого интервала мощностью 75 м. Основные виды и объемы работ приведены в табл. 1.

С 2014 года до настоящего времени геологоразведочных работ на участке не проводилось. В 2016 г. проект строительства подземного сооружения получил положительное заключение Главного управления государственной экспертизы и на участке было начато строительство наземных сооружений.

Результаты работ. В соответствии с полученными результатами изученный массив представлен нижнеархейскими гнейсами, пронизанными дайками долеритов и габбро-диабазов. Образование основной массы пород происходило в условиях гранулитовой фации регионального метаморфизма. Гнейсы и кристаллические сланцы формируют около 4/5 геологического разреза участка. Нижнеархейский возраст гнейсов (3221 ± 15 Ма) был подтверж-

Таблица 1. Основные виды и объемы работ по изучению недр Енисейского участка при поисково-оценочных работах и инженерных изысканиях [2]

Виды исследований	Поиски и оценка участка (2009–2012 гг.)	Инженерные изыскания (2013–2014 гг.)
Количество глубоких скважин	14	6
Объем бурения, п. м.	7602,5	2657
Геофизический каротаж, п. м.	7575	2098
Анализы свойств горных пород	452	95
Поинтервальные откачки	150	79
Кустовые откачки	2	6
Химические анализы воды	148	93
Изотопные анализы воды D, ^{18}O	19	82
Датирование возраста воды	19 – ^{14}C	12 – ^{14}C, ^{36}Cl

ден $^{207}Pb/^{206}Pb$ анализом циркона, выделенного из скважины Р-2, пробуренной на Енисейском участке и вскрывшей гнейсы атамановской серии [7].

Дайки долеритов в современном виде представлены глубоко метаморфизованными, породами, зачастую превращенными в ортоамфиболиты.

Крупных дизъюнктивных дислокаций (разломов) в пределах площади подземного объекта не выявлено, но отдельные скважины встретили редкие тектонические трещины на глубине целевого интервала и глубже него. В основном трещиноватость проявлена на небольших глубинах, где она связана с разгрузкой напряженно-деформированного состояния пород.

С поверхности участок перекрыт сплошным чехлом четвертичных элювиально-делювиальных отложений мощностью до 44,9 м. Покровные отложения (преимущественно суглинки и супеси) в основном слабопроницаемы и играют роль экрана, препятствующего обводнению массива.

Высокий уровень метаморфизма обусловливает большие прочность и крепость коренных кристаллических пород, уровень ослабления которых определяется только наличием трещиноватости. В зависимости от степени трещиноватости средний предел прочности образцов при одноосном сжатии у гнейсов варьируется в пределах 78,6…104 МПа, а метадолеритов – в пределах 117…182 МПа.

Вследствие интенсивного метаморфизма все коренные кристаллические породы обладают крайне низкими коллекторскими свойствами. По лабораторному изучению керна выявлено, что открытая пористость в среднем равна 0,33 %. Опытно-фильтрационные работы показали, что в пределах всего участка от его поверхности до изученной глубины 700 м преобладающими являются водонепроницаемые породы. Почти 70 % всех значений коэффициентов фильтрации принадлежит к интервалу значений 0,0001…0,001 м • сут$^{-1}$, а медианное значение этого показателя равно 0,0004 м • сут$^{-1}$ [6].

В 2016 году, рассмотрев результаты работ, ГКЗ Роснедра подтвердила «что, по своим геологическим, гидрогеологическим, тектоническим и сейсмическим условиям участок «Енисейский» является потенциально пригодным для глубинного захоронения радиоактивных отходов в объеме до 160 тыс. м^3 в архейских гнейсах Нижне-Канского массива в целевом интервале глубин 450–525 метров…». Участок был признан пригодным для геологической разведки и опытной эксплуатации. Вместе с тем, экспертная комиссия ГКЗ сделала ряд рекомендаций, наиболее существенными из которых можно считать выполнение геологической разведки участка «Енисейский». В разведке дальнейшего ГКЗ Роснедра рекомендовала уточнить геологическое строение, гидрогеологические условия и геоэкологическую обстановку на вероятных путях миграции радионуклидов. Наиболее приоритетными задачами ГКЗ назвала исследования «по направлению линии разгрузки потока подземных вод от объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов до р. Енисей», определение возраста вод по линии разгрузки потока подземных вод в р. Енисей, определение сорбционных свойств массива на участке распространения загрязненных подземных вод от объекта до зоны разгрузки потока подземных вод в р. Енисей.

Эти приоритетные задачи вытекают из недостаточной изученности участка, так как практически все исследования были сосредоточены на ближайшей периферии объекта окончательной изоляции РАО. Миграция загрязненных вод от подземного объекта возможна на северо-запад в сторону Енисея (4,5 км от объекта) или на северо-восток в сторону речки Шумихи (1–2 км). К сожалению, на поисковой и оценочной стадии направления возможной миграции подземных вод остались неисследованными.

Проблемы дальнейшего изучения. В 2016 году «НО РАО» получило в Роснедрах лицензию на «захоронение радиоактивных отходов в глубоких горизонтах на Енисейском участке Нижне-Канского массива»,

при этом отказавшись от лицензии на геологическое изучение. Согласно действующей лицензии, участок площадью всего 1,75 км^2, имеет статус горного отвода (рис. 1). При рассмотрении результатов работ в 2016 году ГКЗ Роснедра определило в качестве приоритетной задачи выполнение геологической разведки. За пять лет, прошедших после рассмотрения результатов оценочной стадии, «НО РАО» не предпринимало действий по выполнению рекомендаций Роснедр, сосредоточившись на строительстве наземных сооружений.

В 2020 году научное руководство над работами на участке Росатомом было поручено Институту проблем безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ РАН). Исходя из поставленным перед институтом задач, ИБРАЭ заключил договор с АО «Красноярскгеология» на составление проекта геологоразведочных работ. Согласно формальным требованиям, действующим в МПР РФ, проект был составлен в рамках имеющейся в «НО РАО» лицензии на площадь 1,75 км^2, а его технические решения опираются как на наземные работы, так и на использование подземной выработки (шахты), строительство которой может начаться в ближайшие годы. В проект включено около 150 различных видов работ и затрат, в том числе 11 126 п. м наземного и 7 238 п. м подземного бурения, 12 500 п. м стандартного комплекса геофизических исследований в скважинах (ГИС) и 11 340 п. м специализированных ГИС, 1 168 фильтрационных опытов (откачек и поинтервальных нагнетаний) и другие работы.

По объему и содержанию задач, поставленных ИБРАЭ, составленный проект более соответствует стадии эксплуатационной разведки, так как, согласно действующим методическим рекомендациям МПР РФ [3], некоторые виды работ на стадии детальной разведки представляются преждевременными.

Главной проблемой, стоящей перед стадией разведки, является необходимость проведения серьезных и объемных работ за пределами лицензионной площади, для чего необходимо ее расширение. Без решения вопроса миграции подземных вод в сторону Енисея и других зон разгрузки положительное решение ГКЗ Роснедр вряд ли будет получено.

Существенными проблемами также являются невыполнение недропользователем условий пользования недрами по составлению и согласованию программы мониторинга геологической среды, а также осуществление мониторинга, хотя активное строительство уже ведется.

Литература

1. Андерсон Е. Б. Подземная изоляция радиоактивных отходов / Е. Б. Андерсон, С. В. Белов, Е. Н. Камнев, И. Ю. Колесников, Н. Ф. Лобанов, В. Н. Морозов, В. Н. Татаринов. Под ред. В. Н. Морозова. – М.: Изд-во «Горная книга», 2011. – 592 с.
2. Лобанов Н. Ф., Бейгул В. П., Лопатин П. В., Озерский А. Ю. Выбор расположения и обоснование пригодности участка для создания подземной исследовательской лаборатории на Нижнеканском массиве горных пород // Горный журнал, 2015. – № 10. – С. 59–63.
3. Методические рекомендации по обоснованию выбора участков недр для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых. Рекомендованы к использованию протоколом МПР России от 03.04.2007 №11-17/0044-пр. ФГУ «ГКЗ», 2007. – 37 с.
4. НП-055-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. «Захоронение радиоактивных отходов. принципы, критерии и основные требования безопасности». Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22 августа 2014 г. № 379. – 54 с.
5. НП-055-04. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. Утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 04.10.2004 г. № 8.
6. Озерский А. Ю., Караулов В. А. Гидрогеологические исследования при изысканиях для подземного строительства в пределах массива кристаллических пород в южной части Енисейского кряжа // Инженерные изыскания, 2012. – № 11. – С. 52–59.
7. Сазонов А. М., Заблоцкий К. А., Линнеманн У., Звягина Е. А., Некрасова Н. А., Наумов Е. А., Сильянов С. А. Геохронология силлиманит-кордиеритовых гнейсов атамановской серии Южно-Енисейского кряжа (Россия). Литосфера, 2017. – (2) : 49–59.
8. Федеральный закон Российской Федерации от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // Российская газета от 15.07.2011 г. № 153. Федеральный выпуск № 5529. – С. 19–20.
9. Geological disposal facilities for radioactive waste: specific safety guide. – Vienna, International Atomic Energy Agency (IAEA), 2011. – 104 p. (IAEA safety standards series,,No. SSG-14).
10. Siting of geological disposal facilities: A safety guide. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 1994. – 33 p.- Safety series No. 111-G-4.1.

К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ ГРАНИЦ ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ СОЗДАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНОЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ В КРАСНОЯРСКОМ КРАЕ

Д. А. Озерский, В. С. Гупало, К. С. Казаков, Г. Д. Неуважаев

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН
Москва, Россия, oda@ibrae.ac.ru

REGARDING THE ISSUE OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT INVESTIGATION AREA BOUNDARIES DETERMINATION AT THE CONSTRUCTION AND OPERATION STAGES OF UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY IN KRASNOYARSKI KRAI

Dmitrii Ozerskii, Vladimir Gupalo, Konstantin Kazakov, Georgii Neuvazhaev

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Science.
Moscow, Russia, oda@ibrae.ac.ru

The underground research laboratory in the Yenisseiskiy Site will be constructed in the nearest future. The foundation of far field borders is necessary for predictive models creating and its realization in the construction project of deep geological radioactive wastes repository.

Захоронение высокоактивных отходов (ВАО) в глубоких геологических формациях расценивается мировым научным сообществом, как единственный практически реализуемый способ решения проблемы накопления отходов данного вида.

Для реализации такого способа требованиями международных документов [1] предусматривается обязательное изучение геологической среды и ее характеристик с последующей оценкой на этой основе эффективности планируемых мероприятий в части защиты окружающей среды. Для этого на участках недр, рассматриваемых для захоронения ВАО, должны создаваться подземные исследовательские лаборатории (ПИЛ), а также реализовываться программы комплексных исследований как с земной поверхности, так и из горных выработок ПИЛ. Результаты таких работ являются основным источником информации для обоснования долговременной безопасности (ОДБ) пунктов глубинного захоронения и разработки их проектных решений.

При этом участки проведения работ по изучению особенностей геологических условий размещения пунктов глубинного захоронения (ПГЗРО), реализуемых в рамках процедур по обоснованию долговременной безопасности, разделяются по степени их удаленности от объекта на так называемые ближнюю и дальнюю зоны ПГЗРО.

В соответствии с терминологией Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), согласно глоссарию [2], дальняя зона определяется как «геосфера за пределами объекта захоронения, ограниченная геологическими слоями, в пределах которых моделирование процессов, протекающих на объекте захоронения, не требует учета влияния отдельных капсул, а рассматривает объект захоронения как единое целое».

Положениями российских нормативных документов [3] также вводятся различия в функциональных назначениях этих областей массива. Так, к ближней зоне отнесены подземные сооружения и конструкции ПГЗРО, подходные и технологические горные выработки, включая нарушенную приконтурную зону массива, а также инженерные барьеры безопасности, направленные на локализацию радионуклидов в пределах области захоронения. К дальней зоне относится геологическая среда, в которой возможна миграция радионуклидов, вышедших из ближней зоны ПГЗРО, и рассматриваемая для предотвращения их дальнейшего попадания в область жизнедеятельности человека.

Соответственно, определяющим функционалом дальней зоны ПГЗРО является:

1. обеспечение физической изоляции отходов от приповерхностной среды и потенциально разрушительных процессов, происходящих в ней;

2. поддержание геохимических, гидрогеологических и геомеханических условий среды, способствующих безопасной эксплуатации и сохранению целостности захоронения после закрытия ПГЗРО;

3. ограничение доступа воды к участку захоронения и сдерживание миграции мобилизованных радионуклидов.

Согласно такому делению, планируемые исследования в ПИЛ, создаваемой на площадке возмож-

ного размещения ПГЗРО, будут осуществляются преимущественно в его ближней зоне и должны быть направлены на:

- детальное изучение геологического строения, механических, гидрогеологических и геохимических условий, включая выявление зон трещиноватости и изучение их водопроводящих свойств;
- проведение натурных экспериментов без использования радиоактивных веществ для изучения поведения материалов и конструкций инженерных барьеров в условиях максимально приближенных к реальным с учетом всех воздействующих факторов, в том числе: давления и тепловых нагрузок, геохимических и биохимических особенностей массива и подземных вод, изменения состояния массива при проведении строительных и горнопроходческих работ;
- подтверждение достоверности параметров и моделей, использованных при выполнении расчетных оценок безопасности, проведение комплексных исследований и получения исходных данных для разработки проекта ПГЗРО в целом, а также демонстрацию технологических решений и методик.

Вопросы изучения дальней зоны ПГЗРО, в силу ее возможного участия в процессах массопереноса радионуклидов при реализации максимально неблагоприятных сценариев эволюции элементов системы захоронения, также требуют пристального внимания. А анализ долговременной безопасности должен подразумевать рассмотрение возможности реализации таких неблагоприятных сценариев за весь период сохранения отходами потенциальной опасности, обеспечивая таким образом комплексность рассмотрения вопросов безопасности и экологии.

При этом, действующими Российскими и международными руководящими документами не устанавливаются границы дальних зон ПГЗРО и их площади, и их размеры должны определяться для каждого ПГЗРО в индивидуальном порядке. В данной связи возникает вопрос – в каких границах и в каком объеме должны производиться исследования дальней зоны для проекта создания ПИЛ и ПГЗРО на участке «Енисейский»?

Для оценки размеров дальней зоны ПГЗРО на участке «Енисейский» были проанализированы основные характерные особенности скальных массивов, определяющие распространение в них радионуклидного загрязнения, обобщен опыт проведения таких работ на зарубежных объектах-аналогах, а также выполнен критический анализ результатов исследований и оценок пригодности участка «Енисейский» на поисковой и оценочной стадиях его изучения.

При захоронении радиоактивных отходов в кристаллических горных породах главным механизмом транспорта радионуклидов является их перенос подземными водами, прошедшими через зону размещения контейнеров с ВАО и их дальнейшее распространение по системе связанных трещин. Благодаря трещинной сети и гидрогеологическим особенностям скальных пород, движение подземных вод может происходить через условные границы ближней и дальней зон, в следствие чего будет формироваться ореол распространения радионуклидов. Это означает, что сеть трещин и их гидравлические свойства требуют детального всестороннего исследования как в ближней, так и дальней зонах [4]. А результаты исследований неоднородностей геологической среды, геомеханических условий и гидрогеологических характеристик ближней и дальней зон [5] становятся основой для создания геологической и гидрогеологической моделей горного массива и формировании на их основе прогнозных расчетов массопереноса радионуклидов за пределы области захоронения. Кроме того, на основе данных модельных расчетов должны формироваться технические решения для ПГЗРО, включая конструкцию инженерных барьеров безопасности, минимизирующих вероятность выхода радионуклидов за пределы упаковок/зоны захоронения [6]. Следовательно, основной для определения границ дальней зоны является численное моделирование процессов массопереноса радионуклидов с подземными водами в геологической среде.

Анализ зарубежного опыта определения границ дальней зоны ПГЗРО (на объектах-аналогах создаваемой на участке «Енисейский» ПИЛ – первой очереди пункта глубинного захоронения высокоактивных отходов) показал, что границы их дальних зон также были установлены на основе численного моделирования геофильтрационных процессов в геологической среде и с учетом плановой локализации зон разгрузки фильтрационных потоков. Разработка геофильтрационных моделей основывалась на комплексном анализе и применении данных по геологическим, гидрогеологическим, геомеханическим и прочим значимым для обеспечения долговременной безопасности захоронения ВАО условиям, примыкающих к потенциальному участку захоронения территорий. Результаты прогнозных оценок таким образом позволили сделать вывод о потенциале выбранных участков для захоронения РАО. Например, на участке исследований французского агентства по ядерным отходам (ANDRA – Agence national pour la gestion des déchets radioactifs), расположенного около деревни Бюр в восточной Франции, было обосновано предположение, что в течение следующих 500 000 – 1 миллиона лет не прогнозируется существенных изменений в гидрогеологических условиях участка площадью около 200 км^2, принятого в качестве границ дальней зоны объекта [7]; на объекте Onkalo, финской компании Posiva, отвечающей за утилизацию отработавшего ядерного топлива, было показано, что в долгосрочной перспективе распро-

странение радионуклидов за пределы зоны захоронения будет происходить в пределах зоны площадью не более 26 км^2 [8].

Применительно к рассматриваемому объекту на участке «Енисейский» также формируются численные прогнозные модели транспорта жидкой фазы, как основной транспортной составляющей процесса возможного поступления радионуклидов в окружающую среду [9, 10, 11]. С помощью расчетного кода GeRa (Geomigration of Radionuclides) [12], [13], предназначенного для трехмерного гидрогеологического моделирования процессов геофильтрации и геомиграции загрязнений в подземных водах (совместная разработка ИБРАЭ РАН (www.ibrae.ac.ru) и ИВМ РАН (www.inm.ras.ru)), разрабатывается гидрогеологическая модель участка Енисейский и смежных территорий (дальней зоны). Модель [14] построена на основе данных по геологическому строению, импортированных из программ геомоделирования, и использует результаты практических опытно-фильтрационных работ в скважинах участка Енисейский [15]. Формируемые таким образом геологические и гидрогеологические модели разрабатываются на основе комплекса данных, полученных за период поисковых и оценочных работ на участке «Енисейский», т. е. за последние 20–25 лет.

В соответствии с результатами выполненных исследований западная граница дальней зоны определяется региональной дреной р. Енисей, что соответствует граничному условию первого рода, остальные границы в плане – условно непроницаемы (второй род), т. к. соответствуют водораздельным областям, нижняя граница (третьего рода) соответствует глубине геологического изучения на поисковой и оценочной стадиях изучения и располагается на 700 м отметке от поверхности. Геофильтрационная модель ПИЛ имеет площадь 176,62 км^2.

Вместе с тем, специфика территориального и ландшафтного расположения участка «Енисейский», признанного ФБУ «ГКЗ» потенциально пригодным для размещения ПГЗРО (по итогам рассмотрения результатов поисковой и оценочной стадий геологического изучения недр в период 2010–2015 гг) и строительства ПИЛ обуславливают возможность установки на настоящем этапе работ плановых границ дальней зоны преимущественно по орографическим границам. Данный аспект реализует рекомендации ФБУ «ГКЗ» о необходимости проведения дальнейших работ по уточнению характеристик геологической среды в пределах лицензионной площади и смежных с ней территорий, формируя задачи и планы по устранению неопределенностей в условиях распределения поверхностного стока, наличия фильтрующих разломов и секущих трещин на больших глубинах, выделения непроницаемых блоков пород, исключающих фильтрацию вод с потенциалом загрязнения.

Совместный анализ результатов геофильтрационного моделирования с классическими представлениями о фильтрационных потоках позволили обосновать первичные границы дальней зоны планируемого ПГЗРО, а также важные для анализа долговременной безопасности показатели геологической среды, которые должны изучаться на последующих этапах (Рис. 1). Сравнительная оценка сформированных границ и результатов зарубежных работ, описанных выше, показала, что предварительная площадь дальней зоны участка «Енисейский», в которой необходимо проводить дальнейшие научные и инженерные исследования, определена, является соразмерной зарубежным аналогам.

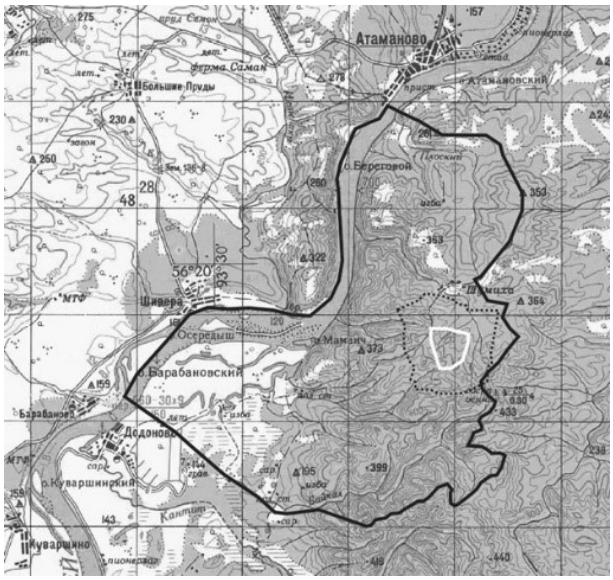


Рис. 1. Границы геофильтрационной модели

Белая линия – граница лицензионной площади Енисейского участка; пунктирная линия – санитарно-защитная зона площадки строительства ПИЛ; черная линия – граница фильтрационной модели.

При этом, общим недостатком всех имеющихся на сегодняшний день моделей (геологической и гидрогеологической) участка «Енисейский» является то, что объем исходных данных о строении и характеристиках массива недостаточен для формирования однозначных выводов о параметрах массопереноса и, как следствие, определения четких границ дальней зоны. Принимая во внимание объем работ поисковой и оценочной стадий, выполненных в рамках выбора потенциально пригодного участка недр для строительства ПИЛ, примененный исследовательский подход актуален в большей степени для целей разведки месторождений полезных ископаемых. С каждой последующей стадией изучения площадь изучаемого участка уменьшалась, что повлияло на равномерность геологической и гидрогеологической изученности. В соответствии с этим, на сегодняшний день можно констатировать факт недостаточной геологической изученности дальней и ближней зон ПГЗРО и отсутствие возможности выполнить мас-

штабную экстраполяцию геологических данных, покрывающих малые площади по отношению к исследуемым.

Вследствие этого границы фильтрационных потоков, определяющие размеры дальней зоны, в первом приближении были приняты преимущественно в соответствии с орографическими принципами. К безусловным недостаткам таких построений относится отсутствие доказательств непроницаемости водосборных границ на глубинах 400, 500 и более метров от дневной поверхности, в которых расположены целевые интервалы исследований ПИЛ.

Для получения достаточного объема необходимых исходных данных в настоящее время разрабатываются программы доизучения недр в ближней и дальней зонах ПГЗРО на участке «Енисейский». Их целью является постановка прогнозной фильтрационной задачи, обоснование граничных условий построений, формирование карт изопроницаемости пород и экстраполяция детальных данных пород ближней зоны ПГЗРО на территорию дальней зоны и т. д.

В соответствии с этим, по мере накопления геологической информации о свойствах горных пород ближней и дальней зон, а также актуализации модельных расчетов будет осуществляться корректировка границ и площадей дальней зоны.

Работы, планируемые в процессе строительства горных выработок ПИЛ [10], а также планы по комплексному доизучению характеристик площади дальней зоны (в установленных на данном этапе работ границах) позволят получить недостающие исходные данные для комплексных расчетных оценок, в т. ч. направленных на установление корректности принятых границ на данном этапе работы.

Литература

1. Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes, Technical Reports Series № 413, IAEA, Vienna, 2003.
2. IAEA Safety Glossary. Terminology used in nuclear safety and radiation protection. IAEA, Vienna, 2018.
3. РБ-003-21 Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов».
4. Гупало В. С., Казаков К. С., Минаев В. А., Озерский Д. А., Устинов С. А., Нафигин И. О. Результаты исследований в существующих скважинах на участке недр «Енисейский», в т ч для определения основных систем трещин и анизотропии массива пород // Радиоактивные отходы, 2021. – № 1 (14). – С 76–86.
5. Кочкин Б. Т. Задачи изучения геологической среды участка Енисейский на текущем этапе реализации проекта захоронения // Радиоактивные отходы, 2019. – № 2 (7). – С. 76–91.
6. Мартынов К. В. Захарова Е. В. Анализ локализации и сценария эволюции ПГЗРО на участке Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы, 2018. – № 2 (3). – С. 52–62.
7. Andra research on the geological disposal of high-level long-lived radioactive waste. Results and perspectives, Dossier, 2005.
8. Site Scale Groundwater Flow in Olkiluoto. Jari Lofman, VTT Energy, Posiva, 1999.
9. Валетов Д. К., Неуважаев Г. Д., Свительман В. С. Разработка геофильтрационной модели для участка «Енисейский» и оптимизация ее параметров при помощи гибридного оптимизационного алгоритма // Известия РАН. Энергетика, 2020. – № 1. – С. 128–137.
10. Neuvazhaev G, Rastorguev A. Substantiation of the rock massif permeability based on packer tests E3S Web of Conferences 98, 10004 (2019).
11. Григорьев Ф. В., Пленкин А. В., Капырин И. В. О необходимости учета конструкции пункта глубинного захоронения РАО при моделировании поступления радионуклидов в дальнюю зону // Радиоактивные отходы, 2018. – № 3 (4). – С. 95–101.
12. Kapyrin, I. Konshin, V. Kramarenko and F. Grigoriev. Modeling Groundwater Flow in Unconfined Conditions of Variable Density Solutions in Dual-Porosity Media Using the GeRa Code // Communications in Computer and Information Science, 2019. – Vol. 965. – P. 266–278.
13. Novikov K., Kapyrin I. Coupled Surface–Subsurface Flow Modelling Using the GeRa Software // Lobachevskii Journal of Mathematics, 2020. – Vol. 41 (№ 4.). – P. 538–551.
14. Морозов О. А., Расторгуев А. В., Неуважаев Г. Д. Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы, 2019. – № 4 (9). – С. 46–62.
15. Гупало В. С., Казаков К. С., Коновалов В. Ю., Демин А. В. О синхронизации мероприятий программы исследований массива с проходческими работами при создании подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве // Горный журнал, 2020. – №3. – С. 72–78.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ БН-800 НА РАДИАЦИОННУЮ ОБСТАНОВКУ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ В РАЙОНЕ БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

А. В. Панов[1], А. В. Трапезников[2], В. К. Кузнецов[1], А. В. Коржавин[2], Н. Н. Исамов[1], И. В. Гешель[1]

[1]Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
Обнинск, Россия, riar@mail.ru
[2]Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН
Екатеринбург, Россия, vera_zar@mail.ru

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF BN-800 OPERATION ON RADIATION SITUATION IN AGRICULTURE IN THE AREA OF BELOYARSK NPP

A. V. Panov[1], A. V. Trapeznikov[2], V. K. Kuznetsov[1], A. V. Korzhavin[2], N. N. Isamov[1], I. V. Geshel[1]

[1]Russian Institute of Radiology and Agroecology
Obninsk, Russia, riar@mail.ru
[2]Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural branch
Ekaterinburg, Russia, vera_zar@mail.ru

The aim of this work was to assess the current radiation situation in the area of Beloyarsk NPP and Institute of Nuclear Materials based on system of radioecological monitoring of agricultural ecosystems. Investigations were performed in 2013–2019 in a 30-km zone around radiation-hazardous facilities. At the control plots, samples of soil, crops, fodder, foodstuffs were taken. The content of natural and artificial radionuclides was assessed. The results of monitoring showed that long-term normalized emissions from radiation-hazardous facilities did not lead to a registered increase in the content of radionuclides in soil, agricultural products and foodstuffs compared to the regional radiation background.

Введение

Более чем 65-летний опыт эксплуатации АЭС в технологически штатном режиме не выявил негативного влияния атомных электростанций на человека и живые организмы (биоту). В то же время, даже в условиях нормальной работы, АЭС производит в строго регламентированных количествах выбросы газоаэрозолей и сбросы технологических вод, содержащих радионуклиды [3]. Поступление в окружающую среду техногенных радионуклидов станционного происхождения может привести к их аккумуляции в отдельных звеньях трофической цепи, что повлияет на формирование дополнительных дозовых нагрузок на население. Сельскохозяйственная продукция и местные продукты питания, производящиеся вблизи АЭС, являются одним из основных источников поступления радионуклидов в организм человека, проживающего в районе размещения атомной электростанции [4]. Критические звенья сельскохозяйственных цепочек для разных регионов могут отличаться, что обусловлено почвенно-климатическими условиями, спецификой ведения агропромышленного производства и особенностями рационов питания населения. Важность оценки воздействия АЭС на сферу сельскохозяйственного производства для обеспечения радиационной безопасности населения, ставит задачу разработки программы, организации и проведения радиационно-экологического мониторинга (РЭМ) агроэкосистем, который должен дать необходимую информацию для анализа последствий влияния работы атомных электростанций на человека и окружающую среду.

Белоярская атомная станция (БАЭС) является единственной в стране АЭС с разными типами энергоблоков. Первые два реактора на тепловых нейтронах (АМБ-100 и АМБ-200), запущенные в 1964 и 1967 гг., остановлены более 30 лет назад и сейчас находятся на стадии вывода из эксплуатации. Реакторы № 3 (БН-600 работает с 1980 г.) и № 4 (БН-800 введен в действие в 2016 г.) на быстрых нейтронах эксплуатируются, вырабатывая ежегодно более 8 млрд кВтч электроэнергии. Энергоблок БН-800 с жидким натрием в качестве теплоносителя является на сегодняшний день крупнейшим в мире реактором на быстрых нейтронах [7–8]. К промплощадке БАЭС примыкает территория АО «Институт реакторных материалов» (ИРМ) в котором эксплуатируется реактор бассейного типа ИВВ-2М мощностью 15 МВт (запущен в 1966 г.). Поскольку радионуклидный состав выбросов ИРМ аналогичен таковым с БАЭС, то при оценке воздействия на окружающую среду, обусловленного радиоактивными выпадениями, указанные радиационно-опасные объекты обычно рассматриваются вместе [7–8]. Необходимо отметить, что радиоэкологическая обстановка в регионе БАЭС определяется многофакторным воздействием. Это не только выбросы и сбросы самой атомной станции и ИРМ, но и глобальный радиационный фон, выбросы расположенных на расстоянии 125 км предприятий ФГУП «ПО «Маяк», радиоактивное загрязнение

ВУРСа и, в некоторой степени, чернобыльские выпадения. Поэтому при оценке вклада выбросов БАЭС и ИРМ в общее радиоактивное загрязнение района их размещения, обычно применяется сравнение с региональным фоновым уровнем содержания радионуклидов в компонентах окружающей среды, включая аграрные.

Газоаэрозольные выбросы БАЭС и ИРМ через воздушный бассейн поступают на почвенно-растительный покров сельскохозяйственных угодий и на поверхность водоемов, использующихся в том числе для орошения полей и водопоя сельскохозяйственных животных. Таким образом, агроэкосистемы с их большой открытой площадью являются естественными природными планшетами, аккумулирующими долгоживущие радионуклиды выбросов БАЭС и ИРМ. Учитывая важность путей поступления техногенных радионуклидов в организм человека с местными сельскохозяйственными пищевыми продуктами, целью настоящей работы являлась оценка современной радиационной обстановки в районе Белоярской АЭС и АО «Институт реакторных материалов» на основе созданной системы радиационно-экологического мониторинга аграрных экосистем.

Материалы и методы

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [10], требованиями МУ-13.5.13-00 [5] и разработанным методологическим подходом [4] в 2013 г. в районе размещения БАЭС создана сеть РЭМ агроэкосистем. На различном расстоянии и направлениях от атомной электростанции заложены контрольные участки – 15 на пашне, 13 на лугопастбищных угодьях и 13 на огородах населенных пунктов. Контрольные участки выбирались с учетом «розы ветров» в период вегетации растений и выпаса животных так, чтобы на доминирующих типах почв региона велось возделывание основных сельскохозяйственных культур, обеспечивая таким образом оценку максимально возможного воздействия БАЭС и ИРМ на агроэкосистемы. Количество контрольных участков, их размещение и число отбираемых проб являлось достаточным для пространственной характеризации уровней содержания радионуклидов в почве агроэкосистем и сельскохозяйственной продукции. Мониторинговые исследования проводились в одно и то же время (август) в 2013 г. на этапе завершения строительства энергоблока БН-800 и в 2019 г., через три года после начала его промышленной эксплуатации. Это дало возможность оценить как многолетнее влияние работы реактора БН-600 на агроэкосистемы, так и изменение радиоэкологической ситуации после начала функционирования нового энергоблока БН-800.

На контрольных участках измеряли мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД), отбирали пробы почв (на пашне пахотный горизонт глубиной 0–20 см, на лугах и пастбищах верхний слой почвы глубиной 0–10 см), продукции растениеводства, кормопроизводства и животноводства. На пастбищных участках брались пробы почвы послойно, что позволило оценить динамику вертикального распределения радионуклидов в почвенном профиле. Продукция растениеводства отбиралась сопряженно с почвой и далее разделялась на хозяйственно-ценную (зерно, клубне- и корнеплоды, овощи) и побочную часть (солома и др.). На участках, где велось наблюдение за миграцией радионуклидов по животноводческой цепочке, проводился отбор проб почвы, рациона сельскохозяйственных животных, молока и говядины. Всего исследовано в 2013 г. – 137, в 2019 г. – 94 образца. В компонентах агроэкосистем оценивали содержание ^{40}K, ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{54}Mn, ^{59}Fe, ^{60}Co, ^{90}Sr, ^{131}I, ^{134}Cs ^{137}Cs, ^{239,240}Pu. В сотрудничестве со специалистами АО «Радиевый институт имени В. Г. Хлопина» в ряде проб сельскохозяйственной продукции определяли ^{3}H и ^{14}C. Пробоподготовку и измерения проб проводили в лаборатории радиационного контроля ФГБНУ ВНИИРАЭ (аттестат аккредитации RA.RU.21АД81). Используемые средства измерений и методическое обеспечение, обеспечивали достоверное определение содержание радионуклидов в почве и сельскохозяйственной продукции на уровне значений регионального фона. Полученные данные по содержанию радионуклидов в продукции растениеводства и животноводства на их соответствие радиологическим стандартам сравнивали с нормативами [2, 9], продукции кормопроизводства с [1].

Результаты и их обсуждение

Основной целью РЭМ является обеспечение радиационной безопасности населения и выявление тенденций изменения радиоэкологической обстановки в регионе размещения АЭС в процессе ее эксплуатации. Поэтому на первом этапе анализа результатов мониторинга оценили плотность загрязнения контрольных участков ^{137}Cs – основным радиологически значимым долгоживущим радионуклидом. Уровни загрязнения ^{137}Cs почв пашни в 30-км зоне влияния БАЭС варьировали в пределах: 1,1–3,9 кБк/м^2 в 2013 г. и 1,3–2,5 кБк/м^2 в 2019 г. Диапазон данных по плотностям загрязнения ^{137}Cs лугопастбищных угодий оказался несколько шире: 1,5–4,5 кБк/м^2 в 2013 г. и 1,6–5,2 кБк/м^2 в 2019 г. Плотности загрязнения ^{137}Cs почв огородов находились в пределах 0,9–5,0 кБк/м^2 за исключением двух населенных пунктов: Режик (7,6 кБк/м^2) и Изумруд (7,7 кБк/м^2), расположенных в 5 и 24 км от БАЭС, соответственно. За время более чем 50-летней работы атомной станции, вследствие несовершенства на ранних этапах ее эксплуатации технологий очистки выбросов, стало образование локальных участков с повышенным уровнем содержания радионуклидов в почвенном покрове с подветренной стороны БАЭС. В то же время эти два контрольных участка нельзя отнести к радиоактивно

загрязненным, поскольку плотность их загрязнения ^{137}Cs не подпадает под границы зонирования земель данной категории (37 кБк/м^2). Представленные результаты служат примером радиоэкологической ситуации в районе не только действующих объектов, но и мест радиационного наследия, характерных для такого рода предприятий ядерно-топливного цикла. Показатели плотностей загрязнения сельхозугодий ^{137}Cs находились примерно на одном уровне вне зависимости от расстояния от БАЭС и года отбора проб, т. е. начало эксплуатации реактора БН-800 не привело к регистрируемому увеличению поступления ^{137}Cs в окружающую среду, включая агроэкосистемы. В целом можно отметить, что газоаэрозольные выбросы БАЭС и ИРМ не вносят значимый вклад в уровни техногенного загрязнения сельскохозяйственных угодий зоны влияния атомной электростанции.

По результатам мониторинга среднее содержание ^{90}Sr в почве агроэкосистем района размещения БАЭС и ИРМ составляет 4,3–7,2 Бк/кг, ^{137}Cs варьирует в пределах 7,5–18,9 Бк/кг. Диапазон вариации среднего содержания в почве рассматриваемого региона естественных радионуклидов составляет: для ^{40}K 286–432 Бк/кг, для ^{226}Ra 16,1–21,7 Бк/кг, для ^{232}Th 20,1–25,5 Бк/кг. В 10 пробах почв агроэкосистем измерен ^{239,240}Pu среднее содержание которого составило – 0,13 Бк/кг при вариации 0,07–0,25 Бк/кг. Поскольку уровень удельной активности изотопов плутония в почве низок и находится в пределах регионального фона, достаточно сложно определить источник его происхождения: выбросы БАЭС и ИРМ, предприятий ФГУП «ПО «Маяк» или глобальные выпадения от испытаний ядерного оружия.

Оценка мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) проводилась с целью выявления возможных мест локальных радиоактивных загрязнений и участков с повышенным гамма-фоном. МАЭД на контрольных участках находилась в диапазоне 0,08–0,13 мкЗв/ч, при среднем – 0,10 мкЗв/ч. Поскольку значимой разницы в МАЭД между пахотными угодьями и лугопастбищными участками обнаружено не было, можно говорить, что большая часть целинных сельскохозяйственных угодий ранее были нарушены многократной агротехнической обработкой. Анализ результатов измерения МАЭД также не выявил достоверных отличий в величине мощности дозы во времени и на различном расстоянии от БАЭС и ИРМ. Диапазон данных МАЭД соответствовал региональному фону с учетом свойств почв и вида агроэкосистем.

На примере двух пастбищных участков дана оценка распределения ^{137}Cs в почвенном профиле на глубину до 20 см и динамики вертикальной миграции данного радионуклида. Отмечен различный характер нахождения ^{137}Cs в почве. Так, на одном участке от 60 до 80 % запаса радиоцезия аккумулировано в верхнем 5-см слое почвы, что говорит об отсутствии влияния на почву пастбища антропогенной деятельности. На другом участке радионуклиды ^{137}Cs распределены достаточно равномерно (по 15–30 % в каждом слое) и, следовательно, участок ранее перепахивался. За 7-летний период на обоих участках произошло некоторое перераспределение радионуклидов в более глубокие слои почв, что обусловлено как отсутствием значимого внешнего поступления ^{137}Cs, так и определенными миграционными процессами перераспределения радионуклидов в почвенном профиле. Таким образом, за время наблюдений выбросы БАЭС и ИРМ не оказали значимого влияния на увеличение содержания ^{137}Cs в почвах агроэкосистем, прилегающих к атомной электростанции.

Содержание природного ^{40}K в продукции растениеводства района Белоярской АЭС варьировало в достаточно широких пределах: от 48 до 526 Бк/кг, что определяется видовыми особенностями растений и характеристиками почв, где выращиваются культуры. В продукции кормопроизводства накопление ^{40}K отмечено в диапазоне 260–543 Бк/кг, в животноводческой продукции в более узких пределах: 18–97 Бк/кг. Данные результаты являются средними показателями, характерными для сельскохозяйственной пищевой продукции Уральского региона.

С точки зрения радиационной безопасности населения, проживающего в районе БАЭС и ИРМ, важным является анализ содержания техногенных радионуклидов в производимой сельскохозяйственной и пищевой продукции, а также оценка ее соответствия установленным радиологическим стандартам. За весь период мониторинговых наблюдений ни в одной из проб агропродукции не обнаружено превышения нормативов [2, 9] по содержанию ^{90}Sr и ^{137}Cs. Так, удельная активность радионуклидов в продовольственном зерне наблюдалась в диапазонах: для ^{90}Sr 1,03–2,8 Бк/кг, для ^{137}Cs 0,15–0,94 Бк/кг. Максимальные уровни накопления ^{137}Cs зафиксированы в ячмене, но они оказались ниже норматива СанПиН в 64 раза. Необходимо отметить, что ни на одном контрольном участке не выделены тренды на увеличение содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в зерновых. Вариации данных по удельной активности радионуклидов в данном виде сельскохозяйственной продукции объясняются гранулометрическим составом почв пашни, сортовыми особенностями растений, погодными условиями и дозами вносимых минеральных удобрений, что в совокупности влияет на степень накопления радионуклидов в растениях.

При мониторинге радиационной обстановки следует обращать особое внимание на продукты питания местного производства с минимальной технологической кулинарной переработкой. Результаты оценки содержания радионуклидов в овощах, картофеле и бахчевых района БАЭС и ИРМ показали, что максимальные уровни удельной активности как ^{90}Sr (0,84 Бк/кг), так и ^{137}Cs (0,26 Бк/кг) отмечались в свекле в 2013 г., однако и они оказались ниже нормативов СанПиН в 45 и 300 раз, соответственно. При

достаточно большом наборе анализируемой продукции растениеводства, производящейся в районе влияния атомной электростанции, нельзя выделить какие-либо продукты с повышенными уровнями накопления радионуклидов или имеющими тенденцию к такому увеличению. Таким образом, эксплуатация нового энергоблока БН-800 не привела к повышению содержания техногенных радионуклидов в продукции растениеводства, а в некоторых из них (например, в свекле и тыкве) отмечено снижение концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в течение 7 лет.

Естественные и сеяные травы, а также солома зерновых, использующиеся для корма сельскохозяйственных животных, накапливают радионуклиды в большей степени по сравнению с зерном, что связано с биологическими особенностями растений. В соломе зерновых с контрольных участков района БАЭС, среднее содержание ^{90}Sr варьировало в пределах 2,3–3,6 Бк/кг, ^{137}Cs 0,7–2,1 Бк/кг. В травостое этот диапазон составлял 1,2–3,5 Бк/кг для ^{90}Sr и 0,5–1,8 Бк/кг для ^{137}Cs, соответственно. Максимальные уровни удельной активности ^{90}Sr в соломе в период наблюдений оказались в 50 раз ниже норматива по содержанию этого радионуклида в кормах [1], по ^{137}Cs эта разница составила 190 раз. Максимальные уровни содержания ^{90}Sr в траве оказались в 14 раз ниже норматива, по ^{137}Cs почти в 56 раз. В целом, представленные результаты показывают, что продукция растениеводства, производящаяся в районе БАЭС и ИРМ, соответствует радиологическим стандартам с большими коэффициентами запаса и не оказывает влияния на формирование дополнительной дозовой нагрузки на население региона атомной электростанции.

Данные мониторинга за 7 лет демонстрируют, что динамика содержания техногенных радионуклидов в молоке зоны влияния БАЭС и ИРМ разнонаправлена: по ^{90}Sr оно несколько возросло, по ^{137}Cs уменьшилось. Однако даже максимальные значения объемной активности ^{90}Sr (0,41 Бк/л) и ^{137}Cs (0,11 Бк/л) в молоке оказались ниже граничных уровней, установленных действующими нормативами СанПиН в 60 раз по радиостронцию и в 900 раз по радиоцезию. Многолетняя эксплуатация БАЭС и ИРМ, а также запуск нового энергоблока БН-800 не привели к регистрируемому увеличению содержания техногенных радионуклидов и в мясной продукции (говядине и свинине), а также птице. В мясе кур концентрация ^{90}Sr и ^{137}Cs в последние годы остается на стабильно низком уровне, а нормируемое содержание ^{137}Cs в говядине в 2019 г. оказалось более чем в 1,5 тыс. раз ниже требований СанПиН. Таким образом можно заключить, что содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в продукции животноводства, производящейся в зоне влияния БАЭС и ИРМ, в последние годы находится на очень низком уровне, а начало эксплуатации реактора БН-800 не привело к повышению в ней содержания основных дозообразующих техногенных радионуклидов.

В 2013 г. выполнены оценки накопления органически связанных ^{3}H и ^{14}C в отдельных видах сельскохозяйственной и пищевой продукции района размещения БАЭС и ИРМ. Анализ полученных данных позволил определить схожий характер накопления этих радионуклидов в агропродукции. Они в большей степени накапливаются в кормах сельскохозяйственных животных, чуть менее в продовольственном зерне. Далее по степени накопления трития и углерода-14 следуют молоко и картофель и в наименьшей степени данные радионуклиды аккумулируются в овощах.

Заключение

Исследования показали, что радиоактивность почв агроэкосистем 30-км зоны влияния Белоярской АЭС и АО «Институт реакторных материалов» определяется содержанием естественных (^{40}K, ^{226}Ra, ^{232}Th) и техногенных (^{137}Cs, ^{90}Sr и в некоторой степени ^{239,240}Pu) радионуклидов. Содержание радиоизотопов наведенной активности (^{54}Mn, ^{59}Fe, ^{60}Co), а также ^{131}I и ^{134}Cs в почвах и сельскохозяйственной продукции находилось ниже порога их обнаружения приборами. Результаты мониторинга также показали, что многолетние газоаэрозольные выбросы Белоярской АЭС и АО «Институт реакторных материалов» не приводят к регистрируемому увеличению содержания техногенных радионуклидов в почве и агропродукции по сравнению с региональным фоном. При этом отмечено, что состав контролируемых радионуклидов от выбросов БАЭС и ИРМ требует анализа, возможного дополнения и совершенствования программ мониторинга. Показана необходимость дальнейшего изучения закономерностей накопления ^{3}H и ^{14}C в сельскохозяйственной и пищевой продукции района размещения АЭС. Более подробно результаты исследований представлены в работе [6].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-19-00016).

Литература

1. Ветеринарно-санитарные требования к радиационной безопасности кормов, кормовых добавок, сырья кормового. Допустимые уровни содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs. Ветеринарные правила и нормы ВП 13.5.13/06-01 // Ветеринарная патология, 2002. – № 4. – С. 44–45.

2. Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормы СанПиН 2.3.2.1078-01 // Бюллетень нормативных и методических документов госсанэпиднадзора, 2002. – № 4 (10). – С. 9–144.

3. Линге И. И. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома / И. И. Линге, И. И. Крышев. – М.: Изд-во «САМ полиграфист», 2015. – 296 с.
4. Кузнецов В. К. Радиационно-экологический мониторинг агроэкосистем в зоне воздействия АЭС: методология и результаты исследований / В. К. Кузнецов, Н. И. Санжарова, А. В. Панов, Н. Н. Исамов // Медицинская радиология и радиационная безопасность, 2019. – Т. 64. – № 4. – С. 25–31.
5. Организация государственного радиоэкологического мониторинга агроэкосистем в зоне воздействия радиационно-опасных объектов. МУ-13.5.13-00 (утв. Минсельхозом РФ 7 августа 2000 г.). – М.: 2000. – 28 с.
6. Панов А. В. Радиационно-экологический мониторинг агроэкосистем в районе Белоярской АЭС / А. В. Панов, А. В. Трапезников, В. К. Кузнецов, А. В. Коржавин, Н. Н. Исамов, И. В. Гешель // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 146–157.
7. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2013 году. – Обнинск: Росгидромет, 2014. – 357 с.
8. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 году. – Обнинск: Росгидромет, 2019. – 324 с.
9. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.3.2.2650-10. (Дополнения и изменения № 18 к СанПиН 2.3.2.1078-01). – М.: Минздрав РФ, 2010. – 13 с.
10. Programmes and systems for source and environmental radiation monitoring. Safety report series №64. – Vienna: IAEA, 2010. – 232 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ДОБЫЧИ УРАНА НА ТЕРРИТОРИЮ МЕСТОРОЖДЕНИЙ «СЕВЕРНЫЙ КАРАМУРУН» И «ЮЖНЫЙ КАРАМУРУН»

Е. Н. Панова[1], П. А. Блынский[1], Е. О. Тлеукенов[1], В. Л. Ленкевич[1], А. К. Торебеков[1], Х. Р. Амагов[1], Д. С. Курманаев[2]

[1]ТОО «Институт высоких технологий»
Республика Казахстан, p.blynskiy@iht.kazatomprom.kz
[2]ТОО «РУ-6»
Республика Казахстан

STUDY OF RADIATION EFFECTS OF URANIUM MINING ON THE TERRITORY OF «NORTH KARAMURUN» AND «SOUTH KARAMURUN» DEPOSITS

E. N. Panova[1], P. A. Blynskiy[1], E. O. Tleukenov[1], V. L. Lenkevich[1], A. K. Torebekov[1], Kh. R. Amagov[1], D. S. Kurmanaev[2]

[1]«Institute of High Technologies» LLP
Republic of Kazakhstan, p.blynskiy@iht.kazatomprom.kz
[2]«RU-6» LLP
Republic of Kazakhstan

The degree of contamination of the soil cover of the geotechnological fields of the «North Karamurun» and «South Karamurun» deposits of «RU-6» LLP which extracts natural uranium by the method of in-situ leaching has been studied. New background data received. The monitoring of the state of the territory was carried out with the determination of the levels of chemical and radiation pollution. Proposals for the remediation of contaminated areas have been developed.

Технология добычи урана методом подземного скважинного выщелачивания (ПСВ) с переработкой получаемых продуктивных растворов методом сорбционного концентрирования, осуществляемая ТОО «РУ-6» на месторождениях «Северный Карамурун» и «Южный Карамурун», расположенных на территории Кызылординской области Республики Казахстан, позволяет минимизировать извлекаемую на поверхность горнорудную массу и является практически безотходным производством. Однако сами по себе урановые месторождения, отрабатываемые методом ПСВ, должны рассматриваться как потенциальный источник радиоактивного и химического загрязнения окружающей среды и образования радиоактивных отходов, что является фактором экологического риска, предусматривающего необходимость проведения комплекса рекультивационных мероприятий.

Основной причиной загрязнения земель рудника является контакт технологических растворов с поверхностью земли в результате возможных нарушения режима работы технологических скважин, нарушения целостности технологических трубопроводов, ремонтные работы на скважинах.

Для оценки воздействия деятельности рудника на окружающую среду необходимо провести радиоэкологические исследования на всей территории геотехнологических полигонов (ГТП) и промышленной площадки с тем, чтобы выявить участки и глубину загрязнения и предложить рекомендации по выбору технологии рекультивации нарушенных земель.

Для сбора данных исторических экологических исследований в районе расположения рудников «Северный Карамурун» и «Южный Карамурун» ТОО «РУ-6» были использованы отчеты об экологических исследованиях в населенных пунктах Шиелийского района, проведенные ТОО «Экосервис С» в 2007 и 2008 годах [1, 2]. Привлекали также данные Национального атласа Республики Казахстан (1 и 3 тома), выпущенного Институтом географии в 2006 году [3, 4]; материалы радиационных исследований в Шиелийском и Жанакорганском районах, проводимых АО «Волковгеология», раздел ОВОС рабочего проекта [5] и материалы радиационного мониторинга, предоставленные ТОО «РУ-6».

В 2003 году специалистами-экологами АО «Волковгеология» проводились исследования солевого и химического состава почв. Согласно результатам исследования, аллювиально-луговые почвы до глубины 30 см имеют повышенное содержание гумуса – 1,646–9,443 %, величина плотного остатка водной вытяжки на глубинах от 0 до 50 см имеет значения 0,62–0,78 % (превышает 0,6 % над фоном), на глубинах 50–100 см – 0,37–0,5 % (не превышает 0,6 % над фоном). Щелочность почв, определяемая по pH водной вытяжки, составляет 8,4–8,7. Среднее значение удельной активности почвы в интервале 0–100 м составляет 1274–1481 Бк/кг [5].

В качестве объектов радиометрического обследования на территории ГТП были выбраны технологические узлы закисления, узлы приготовления продуктивного и выщелачивающего раствора, территория вдоль трубопроводов, оголовки скважин. Особое внимание при проведении радиометрического обследования и составлении карт радиационного загрязнения было уделено местам возможного контакта урансодержащих технологических растворов с грунтом на территории ГТП.

Для проведения пешеходной гамма-съемки была выбрана сеть 50 × 50 со сгущением при обнаружении участков возможного радиационного загрязнения. Пешеходную гамма-съемку проводили с помощью дозиметра-радиометра МКС-1117-АТ, диапазон измерений прибора находится в пределах от 0,05 до 300 мкЗв/ч. Координаты замеряемых точек определяли при помощи GPS-навигатора GARMIN. При измерении мощности дозы и дозы кратковременно действующего излучения (одиночный всплеск длительностью не менее 30 мс или серия всплесков) прибор выдает информацию о среднем и максимальном значениях мощности дозы за время кратковременного действия излучения, а также данные о длительности воздействия. Измерения мощности экспозиционной дозы (МЭД) проводили на высоте 1 метра от поверхности и на высоте 0,1 м при локализации участков радиационного загрязнения.

В целях оценки воздействия и сравнения состояния окружающей среды на ненарушенных природных и нарушенных производственных территориях, в районе расположения месторождений «Северный Карамурун» и «Южный Карамурун» выбран участок с аналогичными природными условиями, экологическое состояние которого можно отнести к фоновому, так как воздействие добычи урана на этом участке исключается.

При выборе фоновой площадки учитывали тип почвы, направление преобладающих ветров и расстояние от границ рудника (дальше 10 км). Естественный фон на расстоянии 10 км от рудника составил 0,14–0,18 мкЗв/ч. Средняя суммарная удельная альфа-активность проб почвы, отобранных с прилегающих к руднику территорий (контрольные точки), составила 465 Бк/кг.

Диапазон полученных значений МЭД по результатам проведения пешеходной гамма-съемки составил от 0,09 до 53,3 мкЗв/ч. Средние значения МЭД по территории ГТП месторождений «Северный Карамурун» и «Южный Карамурун» составили 0,25–0,30 мкЗв/ч.

Средние значения МЭД при послойном снятии грунта в районе расположения скважин и на остальной территории ГТП месторождения «Северный Карамурун» представлены на рисунке 1.

На территории отработанных блоков месторождений в точках, определенных по результатам дозиметрического обследования, был проведен отбор проб почвы методом конверта, послойно до глубины

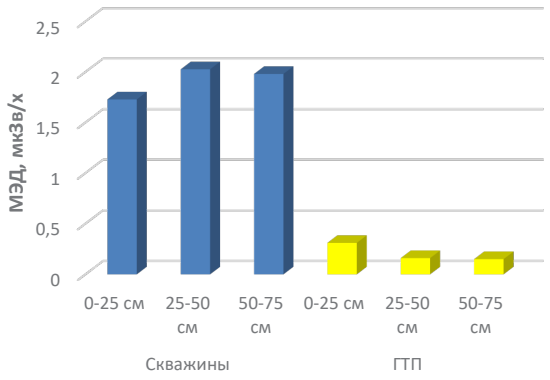


Рис. 1. Средние значения МЭД при послойном снятии грунта участка отработанного технологического блока месторождения «Северный Карамурун»

1 м, с шагом 0,25 м. Дозиметрический контроль проводили в точках отбора проб, а также для отдельно отобранных проб грунта. Всего было отобрано 58 проб почвы. При отборе проб дополнительно определяли географические координаты (GPS-контроль), проводили фотодокументирование проводимых работ (рисунок 2).

Отобранные пробы были переданы в лабораторию для проведения следующих видов анализов: суммарная удельная активность альфа- и бета-излучающих радионуклидов; определение уровня pH; плотный остаток водной вытяжки.

Результаты радиологических исследований показали, что суммарная удельная альфа-активность большинства проб почвы с территории ГТП не превышает 1200 Бк/кг сверх естественного фона, характерного для аналогичных земель данной местности, для 12 % проб значения альфа-активности не превышают 7400 Бк/кг и для некоторых проб превышают уровень, допустимый при рекультивации по сельскохозяйственному направлению [6]. Среднее значение суммарной удельной альфа-активности проб почвы, отобранных в различных участках ГТП, составило 18 000 Бк/кг.

Согласно [6] для 98 % проб почвы наблюдается превышение по плотному остатку водной вытяжки, в то же время более 96 % проб почвы не показали превышение по уровню pH водной вытяжки.

Средние значения удельной альфа- и бета-активности почвы при послойном снятии грунта в районе скважин и на остальной территории ГТП месторождений «Южный Карамурун» и «Северный Карамурун» представлены на рисунках 3 и 4.

Согласно Экологическому кодексу Республики Казахстан (статья 369) твердые отходы относятся к радиоактивным, если их удельная активность превышает 10 000 Бк/кг для альфа-излучателей и 100 000 Бк/кг для бета-излучателей.

Проведенные исследования показали, что грунт в районе откачных скважин, трубопроводов и выявленных загрязненных участков представляет собой НРАО (превышены уровни в 10 000 Бк/кг по удельной альфа-активности).

По результатам проведенных работ сделаны следующие выводы. В целом территория ГТП рудников «Северный Карамурун» и «Южный Карамурун» (в отдалении от скважин и трубопроводов) показывает средние значения МЭД 0,2–0,4 мкЗв/ч. Согласно Приложению 12 [6], по окончании рекультивации МЭД гамма-излучения, средняя по всей площади рекультивированного объекта, не должна превышать 0,2 мкЗв/ч сверх естественного фона, характерного для данной местности, в отдельных локальных точках (не более 20 %) – не более 0,5 мкЗв/ч. Таким образом, полученные данные свидетельствуют об отсутствии радиоактивного загрязнения на большей части ГТП. Некоторое превышение уровня по удельной альфа-активности наблюдается в районе скважин и трубопроводов.

Рис. 2. Отбор проб на территории ГТП

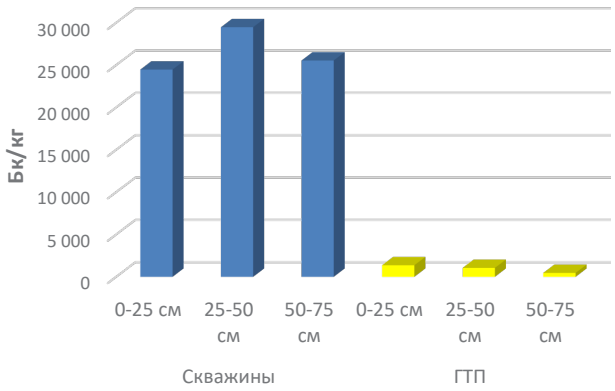


Рис. 3. Средние значения удельной альфа-активности при послойном снятии грунта участка отработанных технологических блоков месторождений «Северный Карамурун» и «Южный Карамурун»

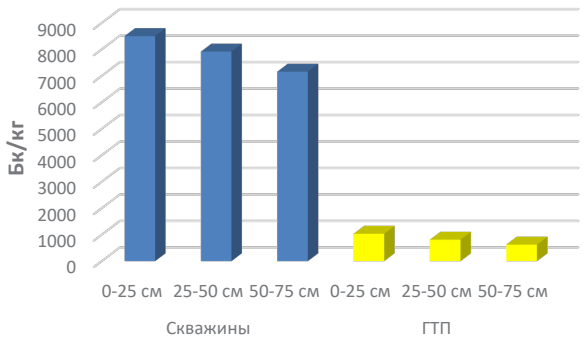


Рис. 4. Средние значения удельной бета-активности при послойном снятии грунта участка отработанных технологических блоков месторождений «Северный Карамурун» и «Южный Карамурун»

Негативное влияние деятельности по добыче урана на состояние почвенного покрова на территории земельных отводов рудников «Северный Карамурун» и «Южный Карамурун» было предусмотрено проектом оценки воздействия на окружающую среду при разработке месторождения. По завершении недропользования на этих территориях в обязательном порядке будет проведена рекультивация нарушенных земель.

Предотвращение образования загрязненного грунта и его своевременная дезактивация должны являться основными направлениями деятельности по уменьшению образования низкорадиоактивных отходов. Для этого необходимо проведение своевременной ликвидации мест контакта технологических растворов с грунтом. Для дезактивации грунта возможно применение технологии выщелачивания грунта на месте, проведение фиторемедиационных работ, проведение боронения поверхностного слоя почвы в местах просачивания технологических растворов на незначительную глубину.

Часть горного отвода предприятия может быть выведена из категории сельскохозяйственных земель при передаче в местные органы власти в связи с засоленностью данных участков. Исследования, проведенные за территорией горного отвода, показывают, что фоновые значения плотного остатка водной вытяжки, pH не позволяют вести полномасштабные сельскохозяйственные работы. Одним из вариантов решения может быть высадка саксаула на территориях, непригодных для возврата в сельскохозяйственный оборот. Это позволит улучшить состояние рекультивируемых земель, создаст дополнительные места выпаса скота для местного населения и улучшит экологическую ситуацию в регионе в целом.

Литература

1. Изучение эколого-радиационной обстановки в уранодобывающих регионах южного Казахстана и воздействие ее на окружающую среду и здоровье населения/ Отчет о НИР / ТОО «Экосервис С». – Этап 1. – Алматы, 2007. – 81 с.
2. Изучение радиоэкологической обстановки в ураноносных регионах юга Казахстана/ Отчет о НИР / ТОО «Экосервис С». – Этап 2. – Алматы, 2008. – 199 с.
3. Национальный атлас Республики Казахстан. Том I. Природные условия и ресурсы / Министерство охраны окружающей среды РК, Министерство образования и науки РК, Комитет науки, Центр наук о земле, металлургии и обогащения, Институт Географии. – Алматы, 2006. – 125 с.
4. Национальный атлас Республики Казахстан. Том III. Окружающая среда и экология / Министерство охраны окружающей среды РК, Министерство образования и науки РК, Комитет науки, Центр наук о земле, металлургии и обогащения, Институт Географии. – Алматы, 2006. – 154 с.
5. Отработка месторождения Южный Карамурун и Северный Карамурун. Внесение изменений и дополнений. Охрана окружающей среды. Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) / ТОО «Проектно-конструкторская организация». – Г.465 – ОВОС. – Т. 2. – Степногорск, 2016. – 160 с.
6. Санитарные правила «Санитарно-эпидемиологические требования к радиационно-опасным объектам» (СП СЭТРОО), утверждены приказом и. о. Министра национальной экономики Республики Казахстан от 27 марта 2015 года № 260.

СКРИНИНГ НАКОПЛЕНИЯ ^{137}Cs В ПОЧВАХ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАЙОНОВ ТУЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Т. А. Парамонова[1], О. Л. Комиссарова[1], Л. А. Турыкин[2], Н. В. Кузьменкова[3,4]

[1]Факультет Почвоведения МГУ имени М. В. Ломоносова
Москва, Россия, tparamonova@soil.msu.ru, komissarova-olga93@yandex.ru
[2]Географический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова
Москва, Россия, filigorod@list.ru
[3]Химический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова
Москва, Россия
[4]Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского
Москва, Россия, kuzmenkova@radio.chem.msu.ru

SCREENING OF Cs-137 ACCUMULATION IN SOILS AND VEGETATION ON THE TERRITORY OF THE PLAVSKY RADIOACTIVE HOTSPOT, TULA REGION

T. A. Paramonova[1], O. L. Komissarova[1], L. A. Turykin[2], N. V. Kuzmenkova[3,4]

[1]Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia, tparamonova@soil.msu.ru, komissarova-olga93@yandex.ru
[2]Geography Faculty, Lomonosov Moscow State University
Russia, filigorod@list.ru
[3]Chemistry Faculty, Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia
[4]Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry
Moscow, Russia, kuzmenkova@radio.chem.msu.ru

At present, on the territory of the Plavsky hotspot (Tula region), the density of surface radioactive contamination of arable chernozems of the watersheds with ^{137}Cs is 3.5–4.4 times, and native soils at the foot of slopes and floodplains – 4.5–6 times more than the standard values of radioecological safety. At the same time, the transfer of ^{137}Cs to agricultural crops (wheat, barley, buckwheat, corn, soybeans, potatoes, amaranth, mustard, sunflower, onion, carrot), as well as to the meadow vegetation is characterized by low intensity, due to which the current levels of the radionuclide accumulation in crop products fully meet the hygienic standards.

Введение

В результате распространения радиоактивных продуктов аварийного выброса Чернобыльской АЭС, прежде всего летучего долгоживущего радионуклида ^{137}Cs, по траектории «Восточного чернобыльского следа» в 1986 г. были загрязнены обширные территории Европейской части России, прежде всего в пределах Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей [2]. Среди них особую озабоченность вызывало радиоактивное загрязнение наземных эскосистем Тульской области ^{137}Cs, поскольку оно охватило все южные районы, входящие в почвенно-географическую черноземную зону и специализированные на земледельческом использовании. В целом, загрязнение почв произошло на площади 11,8 тыс. км^2, что составило около половины (46,8 %) территории Тульской области [3].

Невозможность использования пашни в черноземном регионе, где сельскохозяйственные угодья занимают свыше 70 % площади земельного фонда, могло обернуться разрушительными последствиями для экономики региона [3, 6]. В этой связи, несмотря на 5–15-кратные превышения допустимого уровня содержания ^{137}Cs в почвах центральной части ореола загрязнения, именуемого Плавским радиоактивным пятном, земли не выводились из оборота, а после проведения глубокой реабилитационной вспашки (до 30 см) продолжали использоваться в качестве пахотных угодий.

В настоящее время, по данным территориального подразделения службы «Агрохимрадиология» Министерства сельского хозяйства РФ, в Тульской области имеется 372,7 тыс. га сельскохозяйственных угодий, загрязненных ^{137}Cs, из них с плотностью поверхностного загрязнения от 37 до 185 кБк/м^2 – 371,9 тыс. га (превышение допустимого уровня содержания ^{137}Cs до 5 раз) и от 185 до 555 кБк/м^2 – 0,8 тыс. га (превышение допустимого уровня содержания ^{137}Cs в 5–15 раз) [3]. Вместе с тем, обследования по программе планового радиационного мониторинга, ежегодно проводимого с 2007 г., не выявляют случаев превышения содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в продуктах питания, произведенных на загрязненных сельскохозяйственных угодьях [3, 7].

Целью настоящей работы была независимая оценка значений плотности поверхностного загрязнения радиоцезием почв Плавского радиоактивного пятна, сопряженная с анализом накопления радиону-

клида в выращиваемых культурах полевого, кормового и овощного севооборотов, а также в естественных травостоях суходольных и влажных пойменных лугов, используемых для заготовки кормов.

Материалы и методы

Определение текущих уровней накопления ^{137}Cs в почвах и растениеводческой продукции на территории Плавского радиоактивного пятна проводилось в течение 2014–2019 гг., т. е. в сроки, приближающиеся к 2016 г., когда закончился первый период полураспада радионуклида, за счет которого в наземных ландшафтах было должно произойти снижение первоначальных запасов ^{137}Cs на ≈ 50 %.

Позиции опробования определялись текущей структурой севооборотов (с 2019 г. на территории Плавского радиоактивного пятна начали также выращиваться овощи) с учетом положения пробных площадок (ПП) в рельефе и по отношению к конфигурации ореола радиоактивного загрязнения почв. Всего было опробовано 14 ПП, охватывающих агроценозы со всеми основными сельскохозяйственными культурами, выращиваемые в регионе (пшеница, ячмень, гречиха, кукуруза, соя, картофель, амарант, горчица, подсолнечник, лук репчатый, морковь, многолетняя бобово-злаковая травосмесь), а также природные биогеоценозы суходольного и влажного пойменного лугов. Преобладающие почвы – пахотные черноземы выщелоченные (агрочерноземы глинисто-иллювиальные) с легкоглинистым гранулометрическим составом; в подножьях склонов и на речных террасах фрагментарно встречаются целинные черноземы выщелоченные (черноземы глинисто-иллювиальные), в пределах речных пойм распространены аллювиальные луговые насыщенные карбонатные (аллювиальные темногумусовые типичные) почвы

На выбранных ПП исследовались запасы ^{137}Cs в поверхностном 30-см слое почв ненарушенного сложения (опробование до глубины 30 см проводилось на основе предварительного изучения профильного распределения радионуклида в пахотных и целинных почвах территории [1]), а также накопление радиоцезия в поедаемой части продукции растениеводства и кормопроизводства. Пробоотбор почв и растительности на каждой ПП производился в 3-кратной повторности.

В лабораторных условиях после просушки, измельчения и гомогенизации проб проводилось измерение содержания ^{137}Cs в почвах с помощью гамма-радиометра «Мультирад» с блоком детектирования БДКС-63-01А (Россия) с использованием программы обработки спектров «Прогресс 5.1», относительная погрешность составляла 10–15 %; удельная активность ^{137}Cs в растительной продукции определялась на полупроводниковом γ-спектрометре GR 3818 с высокочистым (HPGe) детектором фирмы Canberra (США), аналитическая ошибка не превышала 5 %.

Для обеспечения сопоставимости результатов опробования различных агроценозов и природных фитоценозов, произведенных в разные годы, все полученные оценки величин удельной активности и запасов ^{137}Cs были приведены (с учетом константы его радиоактивного распада) к состоянию на 2016 г.

Рис. 1. Расположение ПП на территории Плавского радиоактивного пятна и плотность поверхностного радиоактивного загрязнения почв с агроценозами и природными биогеоценозами

1 – пшеницы, 2 – ячменя, 3 – гречихи, 4 – кукурузы, 5 – сои, 6 – картофеля, 7 – амаранта, 8 – горчицы белой, 9 – подсолнечника, 10 – лука репчатого, 11 – моркови, 12 – многолетней травосмеси, 13 – суходольного луга, 14 – влажного пойменного луга (на основе прогнозной картосхемы загрязнения почв Тульской области на период 2016 г. [2]).

Результаты и их обсуждение

Сопоставление полученных в настоящем исследовании данных по плотности поверхностного радиоактивного загрязнения почв Плавского радиоактивного пятна с проведенной специалистами прогнозной оценкой трансформации геохимического поля загрязнения наземных экосистем радиоцезием к 2016 году выявило высокую согласованность оценочных и эмпирических данных (рис. 1). По сравнению с первоначальной конфигурацией ореола радиоактивного загрязнения области наиболее высоких превышений допустимого уровня содержания ^{137}Cs в почвах сократились и сосредоточились в центральной части Плавского цезиевого пятна, преимущественно в долине малой реки Локна.

Вместе с тем, анализ распределения запасов ^{137}Cs в почвах элементарных ландшафтов территории свидетельствует о том, что существенное изменение плотности их поверхностного радиоактивного загрязнения связано не только с процессом распада радионуклида, но во многом определяется вторичной миграцией радиоцезия в составе твердого поверхностного стока с эродируемых распаханных склонов в транзитно-аккумулятивные ландшафты их подножий, а также в аккумулятивные ландшафты речных пойм. В этой связи эродируемые элювиальные и транзитные позиции междуречий Плавского радиоактивного пятна в настоящее время характеризуются 3,5–4,4-кратным превышением радиоэкологических стандартов (исключение составляет пахотный чернозем агроценоза гречихи, повышенная плотность радиоактивного загрязнения которого определяется приуроченностью к центральной части ореола), в то время как переотложение ^{137}Cs-содержащего мелкозема в подножьях склонов, в тальвегах сухих балок и в поймах рек привело к 4,5–6,0-кратному превышению нормативов (табл. 1).

Контрастность загрязнения почв, связанная с латеральным переносом радионуклида в склоно-

Таблица 1. Накопление ^{137}Cs в почвах и растительной продукции, выращиваемой на территории Плавского радиоактивного пятна Тульской области

№ ПП	Агроценоз/ биогеоценоз – элементарный ландшафт*	^{137}Cs в почве		Превышение допустимого уровня содержания ^{137}Cs в почве (37 кБк/м^2)	^{137}Cs в растительности	Допустимый уровень содержания ^{137}Cs в растительности
		Бк/кг	кБк/м^2	разы	Бк/кг	Бк/кг
1	Пшеница – Э	435 ± 32	161 ± 13	4,4	3,1 ± 1,7 (зерно)	70[1]**
2	Ячмень – Э	363 ± 68	150 ± 28	4,1	6,1 ± 2,3 (зерно)	70[1]
3	Гречиха – Т	647 ± 90	217 ± 39	5,9	9,5 ± 4,5 (зерно)	–
4	Кукуруза – Э	338 ± 77	129 ± 28	3,5	6,3 ± 1,7 (зерно) 38,4 ± 6,1 (стебли и листья)	70[1] 600[2] ***
5	Соя – Т	434 ± 47	160 ± 25	4,3	7,4 ± 1,3 (бобы)	50[1]
6	Картофель – Э	389 ± 18	147 ± 29	4,0	5,0 ± 0,4 (клубни)	80[1]
7	Амарант – ТА	541 ± 148	187 ± 48	5,1	46,8 ± 14,2 (стебли и листья)	600[2]
8	Горчица – ТА	522 ± 54	201 ± 31	5,4	4,1 ± 2,4 (семена)	70[1]
9	Подсолнечник - Э	356 ± 54	139 ± 11	3,8	9,7 ± 3,8 (семена) 20,6 ± 0,4 (стебли и листья)	70[1] 600[2]
10	Лук – ТА	420 ± 38	168 ± 27	4,5	0,5 ± 0,1	80[1]
11	Морковь – Э	372 ± 31	140 ± 22	3,8	4,7 ± 0,9	80[1]
12	Травосмесь – Э	418 ± 77	145 ± 18	3,9	20,1 ± 4,6 (стебли и листья)	370[2]
13	Суходольный луг – ТА	650 ± 71	223 ± 24	6,0	23,2 ± 6,1 (стебли и листья)	370[2]
14	Влажный пойменный луг – А	685 ± 55	216 ± 11	5,8	18,2 ± 6,7 (стебли и листья)	370[2]

* Элементарные ландшафты: Э – элювиальные, Т – транзитные, ТА – транзитно-аккумулятивные, А – аккумулятивные; ** [1] – согласно СанПиН 2.3.2.1078-01 [8]; *** [2] – согласно КУ-94 [4].

вых ландшафтах, особенно ярко проявляется при сравнении запасов ^{137}Cs в почвах непосредственно геохимически сопряженных катен, в частности, в системе ПП6–ПП12 (145–147 кБк/м^2) – ПП5 (160 кБк/м^2) – ПП13–ПП14 (216–223 кБк/м^2). При этом почвы транзитно-аккумулятивных ландашфтов могут обладать большими запасами радионуклида, чем почвы аккумулятивных позиций пойм, что отражает процесс отложения основной части твердого эрозионного стока в подножьях склонов и устьевой части сухих балок. Подобные тренды трансформации геохимического поля загрязнения почв радиоцезием отмечались для территории Плавского радиоактивного пятна и другими исследователями [9, 10, 11].

При сохраняющемся радиоэкологическом неблагополучии поверхностного радиоактивного загрязнения почв Плавского радиоактивного пятна ^{137}Cs, анализ накопления радионуклида в зерновых (пшеница, ячмень, кукуруза, гречиха), зернобобовых (соя), клубневых (картофель), жиромасличных (подсолнечник, горчица белая), кормовых (амарант), овощных (лук репчатый и морковь) культурах, а также в многолетних сеяных и природных травах (травосмесь, травостои суходольного и влажного пойменного лугов) выявляет низкую интенсивность перехода радионуклида из почв в растения благодаря очень прочной необменной фиксации ^{137}Cs глинистыми минералами почв [5], которая определяет резкое снижение биологической доступности экотоксиканта. Уровень его накопления в продукции растениеводства на порядок ниже нормативных гигиенических требований по безопасности растительных пищевых продуктов [8] и ветеринарных требований к содержанию экотоксикатов в кормах [4].

Заключение

Сельскохозяйственные земли, загрязненные аварийными выпадениями ^{137}Cs из атмосферы, долговременно сохраняют свой статус радиоактивно загрязненных. При этом с течением времени происходят значительные изменения конфигурации ореола радиоцезиевого загрязнения, связанные как с естественным радиоактивным распадом изотопа, так и с процессами его вторичного перераспределения в системе сопряженных склоновых ландшафтов, которое характеризуется тенденциями к относительному повышению плотности поверхностного загрязнения почв геохимически подчиненных позиций рельефа. В настоящее время на территории Плавского радиоактивного пятна запасы ^{137}Cs в нераспахиваемых почвах подножий склонов, надпойменных террас и пойм малых рек ≈ в 1,5 раз больше, чем в пахотных черноземах междуречий и в 4,5–6 раз больше нормативных величин радиоэкологической безопасности. При этом переход ^{137}Cs в продукцию сельскохозяйственных культур, а также в луговую растительность сенокосов и пастбищ характеризуется низкой интенсивностью, благодаря чему текущие уровни накопления радионуклида в продукции растениеводства и кормах полностью удовлетворяют санитарно-гигиеническим стандартам.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 14-05-00903 и № 20-35-90119.

Литература

1. Анализ вертикального распределения цезия-137 в профиле пахотных черноземов при различных схемах их опробования / Т. А. Парамонова, В. Р. Беляев, М. М. Иванов, О. Л. Комиссарова // Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий: последствия и пути преодоления. Сб. тр. конференции, 19–21 апреля 2016, г. Обнинск. – Обнинск: НПО Тайфун, 2016. – С. 338–346.
2. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси / ред. Ю. А.Израэль, И. М.Богдевич. – Минск: Фонд «Инфосфера» – НИА-Природа, 2009. – 140 с.
3. Доклад об экологической ситуации в Тульской области за 2019 г., 2020. URL: https://www.ecoindustry.ru/gosdoklad/view/623.html (дата обращения: 27.03.2021).
4. КУ-94. Контрольные уровни содержания радионуклидов цезия-134,-137 и стронция-90 в кормах и кормовых добавках Инструкция о радиологическом контроле качества кормов (утв. Главным государственным ветеринарным инспектором РФ 1 декабря 1994 г. № 13-7-2/216), 1994. URL: https://docs.cntd.ru/document/9011503 (дата обращения: 27.03.2021).
5. Показатели специфической сорбционной способности почв и минеральных сорбентов в отношении ^{137}Cs / Круглов С. В., Анисимов В. С., Анисимова Л. Н., и др. // Почвоведение, 2008. – № 6. – С. 693–703.
6. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2018: Стат. сб. – М.: Росстат., 2018. – 1162 с.
7. Российский национальный доклад: 30 лет чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России. 1986–2016 / ред. В. А. Пучков, Л. А. Большов. – М.: Академ-Принт, 2016. – 202 с.
8. СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов». 2002 (с изменениями на 6 июля 2011 года). URL: https://base.garant.ru/4178234/.
9. Шамшурина Е. Н., Голосов В. Н., Иванов М. М. Пространственно-временная реконструкция

поля выпадения чернобыльского ^{137}Cs на почвенный покров в верховьях бассейна реки Локны // Радиационная биология. Радиоэкология, 2016. – № 4. – С. 414–425.
10. Эрозия как фактор трансформации радиоактивн загрязненя почв на водосборе Щекинского водохранилища (Тульская область) / В. Н. Голосов, М. М. Иванов, А. С. Цыпленков и др. // Почвоведение, 2021. – № 2. – С. 247–260.
11. Spatial variability and topographic factors of Cs-137 soil contamination at a field scale / V. G. Linnik, A. A. Saveliev, A. P. Govorun et al. // Int. J. Ecology and Development, 2007. – V. 8 (7). – 8–25 p.

ВУЛКАНО-ПЛУТОНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И МИНЕРАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СТРАТЕГИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ ПРИАРГУНЬЯ

В. А. Петров, О. В. Андреева, В. В. Полуэктов, Д. В. Коваленко

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН
Москва, Россия, vlad243@igem.ru

VOLCANO-PLUTONIC COMPLEXES AND MINERAL SYSTEMS OF STRATEGIC METAL DEPOSITS IN PRIARGUN REGION

V. A. Petrov, O. V. Andreeva, V. V. Poluektov, D. V. Kovalenko

Institute of geology of ore deposits, petrography, mineralogy and geochemistry RAS
Moscow, Russia, vlad243@igem.ru

The evolution of the ore-bearing geological structures of the Priargun region is considered in the context of changes in the geodynamic regimes of the Proterozoic (completed about 600 Ma), Caledonian (~ 520–410 Ma) and Hercynian (~ 360–210 Ma) tectonomagmatic cycles, as well as during the Late Mesozoic (~ 160–100 Ma) intraplate tectonomagmatic activation. The activation is the most productive for the manifestation of tectonothermal events and ore-genetic processes that determined the metallogenic appearance of the territory. Special attention is paid to the geodynamic conditions of formation and spatial-temporal relations of subalkaline magmatites of the latite series (Shakhtama complex) with Au, Cu–Mo, Pb–Zn–Ag specialization, volcanic-plutonic complexes (Priargun and Turgin series) with Mo–U, Pb–Zn and fluorite ores in caldera-like structures, as well as Li–F granitoids of the Kukulbey complex with Sn–W–Li–Ta spectrum of mineralization.

Введение

Южное Приаргунье занимает юго-восточную часть Приаргунского тектонического блока (Аргунской структурно-формационной зоны), входящего в состав Центрально-Азиатского подвижного пояса. Блок характеризуется ранней консолидацией доактивизационного (домезозойского) фундамента (Рыбалов, 2002) и развитием рудоносных вулканогенных структур (Стрельцовская и Куйтунская кальдеры, Куладжинская и Дорнотская вулкано-тектонические структуры (ВТС), другие вулканические постройки), которые образуют Монголо-Приаргунский вулканический пояс СВ-ЮЗ простирания (Соловьев и др., 1977; Ищукова и др., 2007). Приаргунье относится к числу достаточно детально изученных горнорудных районов. Однако многие вопросы, включая тектонические, геодинамические, петрологические аспекты формирования вулкано-плутонических комплексов и связанных с ними минеральных систем месторождений стратегических металлов, рассматривались изолированно и вне связи с аналогичными процессами в соседних (Северо-Восточный Китай, Восточная Монголия) регионах. Например, дискуссионными остаются вопросы геодинамических условий формирования субщелочных магматитов шахтаминского комплекса с Au, Cu–Mo, Pb–Zn–Ag металлогенической специализацией, вулкано-плутонических комплексов с Mo–U, Pb–Zn и флюоритовыми рудами в вулканических постройках и лейкогранитов кукульбейского комплекса с Sn–W–Li–Ta спектром минерализации. С нашей точки зрения, это связано с разнообразием изучаемых обстановок, которые в сложной мозаично-блоковой структуре всего Забайкалья сближены во времени и пространстве.

В предлагаемом для обсуждения докладе предпринята попытка рассмотреть эволюцию геологических структур и обстановок формирования рудоносных флюидно-магматических (минеральных) систем месторождений стратегических металлов Южного Приаргунья в рамках концепции тектономагматического цикла (ТМЦ). Под ТМЦ нами понимается продолжительный во времени процесс, который пространственно объединяет становление вулкано-плутонических комплексов различного состава, проявление в них метаморфических и гидротермально-

метасоматических преобразований и формирование сопровождающей рудной минерализации на фоне заложения, развития, перехода в латентное состояние и реактивации каркаса разрывных нарушений.

Материалы и методы

Реконструкция эволюции геологических структур и обстановок формирования минеральных систем месторождений стратегических металлов Южного Приаргунья проведена на основе геолого-геофизических, геоструктурных, минералогических, петрогеохимических, геохронологических, изотопных и других данных. Их анализ показывает, что развитие геологических структур Приаргунья происходило в течение протерозойского (завершился около 600 млн лет назад), каледонского (~ 520–410 млн. лет назад) и герцинского (~ 360–210 млн лет назад) ТМЦ, в позднем мезозое (~ 160–100 млн лет назад) в процессе тектономагматической активизации (ТМА) и на неотектоническом этапе развития региона (Петров и др., 2017). Материалы по последовательности проявления тектономагматических процессов обобщены на рис. 1.

Позднемезозойская ТМА наиболее продуктивна по проявлению тектонотермальных событий и рудогенетических процессов, определивших металлогенический облик территории. В этой связи пространственно-временные закономерности формирования мезозойских рудоносных вулкано-плутонических комплексов, несущих разнообразную минерализацию, авторы рассматривают на примере Стрельцовской кальдеры. Интерес к этой вулканической структуре обусловлен рядом причин, основные из которых: уникальность запасов локализованных в кальдере урановых месторождений Стрельцовского рудного поля; использование разреза вулканогенно-осадочных пород кальдеры (трахибазальт-трахириодациты приаргунской и перекрывающие их риолиты тургинской серий) в качестве типового для Южного Приаргунья и Восточной Монголии (Дорнотская ВТС); отсутствие сравнительных данных по геодинамическим условиям формирования и петрогеохимии пород кальдеры и рудовмещающих метасоматитов с другими мезозойскими вулкано-плутоническими комплексами Приаргунья и прилегающих территорий Китая; некоторая обособленность реконструкций места и времени проявления урановорудных процессов от динамики формирования металлогении региона; существовавшие ограничения на публикацию материалов по урановой тематике и малодоступность территории для проведения работ неспециализированными на уран организациями.

Именно для района Стрельцовской кальдеры методами структурной геологии и тектонофизики установлено, что в рамках каждого ТМЦ происходила дифференцированная активизация зон разломов, сопровождавшаяся изменением структуры поля напряжений и деформаций, скоростей (амплитуд) и типов (сдвиг, сброс, взброс) тектонических перемещений, а также изменением условий фильтрации рудоносных растворов (Petrov et al., 2015).

Приаргунье представляет собой область очень широкого и разнообразного проявления метасоматических процессов. На примере этого региона возможно в общих чертах проследить характер развития метасоматических процессов в зависимости от преобладающего типа магматизма (гранитоидного редкометального – кукульбейский тип или гранитоидного субщелочного – шахтаминский тип). Для лейкогранитов и редкометальных гранитов типоморфны

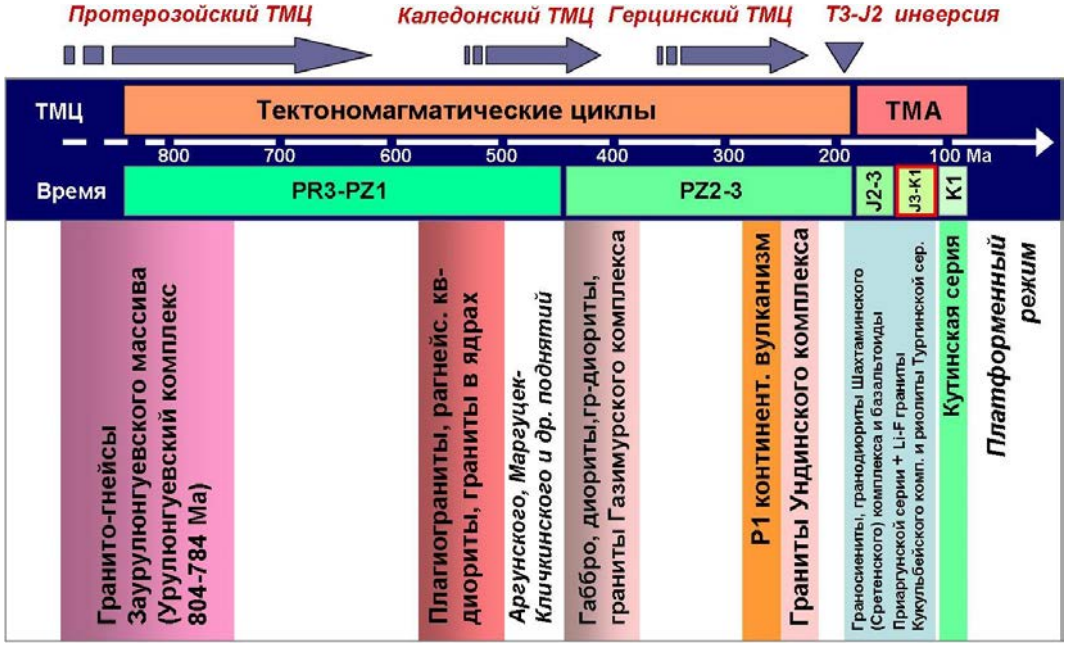


Рис. 1. Схема последовательности тектономагматических событий в регионе

грейзены и в гораздо меньшей степени березиты и аргиллизиты. Для субщелочного шахтаминского комплекса и эффузивно-гипабиссального комплекса тургинской серии характерен более широкий спектр метасоматитов, но за исключением грейзенов. Урановая минерализация ассоциирует только с наиболее низкотемпературной частью этого спектра (аргиллизиты, гидрослюдизиты). Известные к настоящему времени основные разновидности метасоматитов Приаргунья рассмотрены в работе (Андреева и др., 2020).

Результаты и их обсуждение

В протерозойский ТМЦ процессы гранитизации метаморфизованных до амфиболитовой фации терригенно-эффузивных образований привели к формированию гранито-гнейсового купола (Зарулюнгуевский массив), породы которого относятся к урулюнгуевскому комплексу позднего рифея (804–784 млн лет) (Геологическое строение…, 1997). Использование дискриминационного критерия Rb–(Y+Nb) для пород Уртуйского и Бамбакайского массивов в обрамлении Стрельцовской кальдеры показало, что урулюнгуевский комплекс был сформирован в син-коллизионной – внутриплитной геодинамической обстановке (рис. 2).

Необходимо отметить, что в гранитном обрамлении Стрельцовской кальдеры развиты мощные СВ-ЮЗ зоны рассланцевания, бластомилонитов и бластокатаклазитов (Петров и др., 2008), в которых выявлены кварц-турмалиновые линзы с рассеянной урановой (настурановой) минерализацией с возрастом 783 ± 26 млн лет (Голубев, 2011). Это свидетельствует в пользу предположения о проявлении урановорудных процессов в шовных зонах гипотетического суперконтинента Родиния, который, как предполагается, возник около 1,1 миллиарда лет назад и распался около 750 миллионов лет назад. В настоящее время данные по столь древней U минерализации в районе Стрельцовской кальдеры являются неполными и требуют существенного дополнения с целью реконструкции динамики рудоподготовительных процессов и определения возможных источников рудного вещества.

В раннем палеозое (каледонский ТМЦ) ядра купольных структур региона вновь подверглись интенсивной гранитизации. Каледонские образования представлены плагиогранитами и в разной степени разгнейсованными кварцевыми диоритами, гранитами, которые слагают ядра Аргунского, Маргуцек-Кличкинского и других поднятий. Крупные плутоны гранодиоритового состава газимурского комплекса ордовик-силурийского возраста завершают каледонский ТМЦ. В связи с этим циклом известны только немногочисленные объекты U и Sn минерализации. Единственное U рудопроявление Досатуй, расположенное к северо-востоку от Стрельцовской кальдеры, залегает в грейзенизированных гнейсах. Изотопный возраст грейзенов отвечает интервалу 482–400 млн лет (ордовик – силур). Рудная минерализация представлена давидитом и браннеритом, возрастные определения по которым отсутствуют. Грейзенизированные породы с турмалином, флюоритом и редкими выделениями касситерита отмечены в районах г. Чир, г. Ботогойтуй и др.

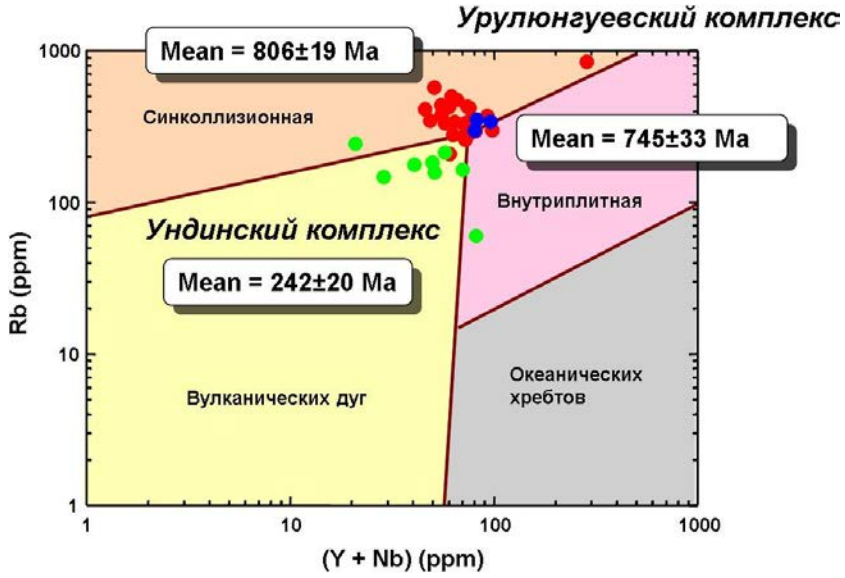


Рис. 2. Rb–(Y+Nb) дискриминационная диаграмма гранитоидных пород района Стрельцовской кальдры. Гранитоиды Уртуйского (красный цвет) и Бамбакайского (синий цвет) гранитных массивов в обрамлении кальдеры относятся к урулюнгуевскому комплексу и сформированы в син-коллизионных/внутриплитных геодинамических условиях. Граниты U–Mo месторождения Антей (зеленый цвет) в фундаменте кальдеры относятся к ундинскому комплексу и приурочены к полю вулканических дуг. Границы полей даны по Pearce et al., 1984

Основная фаза структурообразования в среднем-позднем палеозое (герцинский ТМЦ) связана с внедрением в ядра купольных поднятий значительных масс габбро, диоритов, гранодиоритов, биотит-роговообманковых и биотитовых гранитов. Позднепалеозойские гранитоиды (преимущественно субщелочные разновидности гранодиорит-гранитного состава) объединяются в ундинский комплекс, который в Восточном Забайкалье формирует огромный батолит (протяженность в СВ направлении более 250 км), доминирующий по занимаемой площади среди всех других разновозрастных гранитоидных образований. Породы этого комплекса, развитые в фундаменте Стрельцовской кальдеры, сформированы (согласно Rb–(Y+Nb) критерию) в геодинамической обстановке вулканических дуг. В ранней перми в западной части Приаргунья и в Восточной Монголии проявился континентальный вулканизм (Шатков и др., 1980), а время (254–245 млн лет) формирования ундинского комплекса (Козлов и др., 2005) отвечает поздней перми-началу раннего триаса. Можно предположить, что ундинский батолит относится к протяженному пермскому вулкано-плутоническому комплексу, который сформировался в конце палеозоя вдоль южного фланга Монголо-Охотской сутуры. Гигантские проявления гранитоидного магматизма завершают орогенные процессы в Центральной Азии (Ярмолюк и др., 2002) и отражают переход к режиму тихоокеанской субдукции (Tang et al., 2016).

Интенсивность проявления рудно-метасоматических процессов в среднем-позднем палеозое заметно возрастает, хотя сколько-нибудь крупные месторождения в связи с ундинскими гранитоидами не известны и рудоносность их в целом оценивается как невысокая. В разных районах Приаргунья отмечены позднепалеозойские флюорит-турмалиновые грейзены с касситеритовой минерализацией и мелкие рудопроявления (например, Иргатуй вблизи г. Краснокаменск). Проявления Sn минерализации (Талан-Гозогор, Угловое) локализованы в грейзенизированных гнейсах и гнейсовидных гранитах к западу от Стрельцовской кальдеры. Грейзеноподобные породы с сульфидной минерализацией возрастом 240 млн лет развиты в ундинских гранитах в низах U–Mo месторождения Антей. Многочисленные находки палеозойских грейзенов известны в районе Кличкинского Pb–Zn рудного поля. В оловоносных грейзенах совместно с касситеритом иногда обнаруживается редкая вкрапленность давидита, монацита, паризита. На Аргунском месторождении в эндо- и экзоконтактах ундинских гранитов с амфиболитами проявлены известковые и магнезиальные скарны (K–Ar датирование по флогопиту 240 ± 2 млн лет) с сульфидной молибденитовой, ортитовой и другой минерализацией.

На границе палеозоя и мезозоя коллизионные геологические структуры Забайкалья из-за глобальной перестройки поля напряжений (Delvaux et al., 1995) испытали инверсию тектонических движений. Она сопровождалась интенсификацией магматических (термальных) и рудообразующих процессов, приведших к образованию разнообразных и значительных по масштабу месторождений. В Приаргунье начало ТМА относится к средней юре. В это время получили развитие монцонит-гранит-гранодиоритовые интрузии (амуджикано-сретенский и шахтаминский комплексы) с преимущественно Au, Cu–Mo, Pb–Zn–Ag металлогенической специализацией. Возрасты пород шахтаминского комплекса (Берзина и др., 2013) и сопровождающих их даек пестрого (от лампрофиров до гранит-порфиров) состава и амуджиканских гранодиорит-порфиров (Чернышев и др., 2014) находятся в интервале 164–153 млн лет, который отвечает времени закрытия центральной части Монголо-Охотского океана, а также началу посторогенного (внутриплитного) развития в средней части Центрально-Азиатского подвижного пояса. В это время в Забайкалье формировались эффузивно-субвулканические образования субщелочного (шошонит-латитового) состава, развитые в вулканогенных прогибах и вулканических кальдерах (Таусон, 1982; Козлов, Ефремов, 1999). Процесс становления шахтаминских гранитов и вулканитов завершается риолитовым комплексом, который отделен от основной фазы вулканизма Монголо-Приаргунского вулканического пояса интервалом примерно 15–20 млн лет.

В Стрельцовской кальдере шахтаминским гранитоидам по возрасту соответствуют вулканиты приаргунской серии базальтового, трахибазальтового и трахириодацитового состава. По данным (Шатков и др., 2010), формирование этих вулканитов происходило в период от 170–165 до 155–150 млн лет. Изотопные и геохимические составы мантийных пород Стрельцовской кальдеры показывают, что расплавы формировались в различных источниках мантии. Источники базальтовых магм характеризовались $\varepsilon_{Nd}(T)$ от –0,9 до –1,4, $I_{Sr}(T) = 0{,}706–0{,}707$, Zr/Nb = 28–30, Nb/U = 4–5, Th/Ta = 11–15, а источники трахибазальтовых расплавов показывают $\varepsilon_{Nd}(T)$ от –1,5 до 3,4, $I_{Sr}(T)$ – от 0,7058 до 0,7065 с отношениями Zr/Nb = 14, Nb/U = 3–8, Th/Ta = 5 (Коваленко и др., 2014, 2015).

Следующий эпизод тектогенеза в Южном Приаргунье характеризуется интенсификацией процессов растяжения и образованием протяженных рифтовых зон. На этом фоне происходило формирование лейкогранитов кукульбейского комплекса с присущим ему Sn–W–Li–Ta металлогеническим спектром. Возраст гранит-лейкогранитных интрузий кукульбейского комплекса по K–Ar и Rb–Sr датированию варьируется от 145 до 140 млн лет (Костицын и др., 1995; Андреева, Головин, 2001). В пределах Шерловогорского рудного района (ближайшего относительно Стрельцовской кальдеры) Rb–Sr датирование субвулканических онгонитов, онгориолитов и гранитов указывает на интервал их формирования 145,7–141,6 млн лет (Перетяжко и др., 2011; Сырицо и др., 2012).

Согласно данным изотопного Rb–Sr датирования биотитовых и Li–F редкометальных гранитов и онгонитов Орловского, Спокойнинского, Этыкинского месторождений и массива Ары-Булак (Костицын и др., 2004), формирование этой серии произошло около 142,1 ± 0,6 млн лет.

С извержением больших объемов риолитовых расплавов (тургинская серия) с изотопным возрастом около 140 млн лет связано образование Стрельцовской кальдеры. В работе (Шатков и др., 2010) приводятся более подробные сведения U–Pb датирования по цирконам из экструзий риолитов, штоков гранит-порфиров, даек граносиенит-порфиров, линз цезиеносных перлитов, которые охватывают интервал от 143 до 127 млн лет. Судя по близким изотопным составам риолитов ($\varepsilon_{Nd}(T)$ от –1 до –2 и $I_{Sr}(T)$ = 0,713–0,715) и трахибазальтов Стрельцовской кальдеры (Коваленко и др., 2014), риолиты предположительно могут рассматриваться как наиболее поздние кислые дифференциаты субщелочных мантийных магм. Наряду с этим имеются петрогеохимические данные, указывающие на то, что тургинские риолиты Александрово-Заводской впадины, расположенной к северо-западу от Стрельцовской кальдеры, представляют собой продукты корового плавления (Сасим и др., 2012).

На постмеловом этапе развития территории тектономагматическая активность затихает. В третичное время и до голоцена проявления обширного базальтового субщелочного магматизма имели место только западнее в районе Витимского плато. В Приаргунье кайнозойская тектоническая активность могла проявиться в результате оживления деятельности разломов ССВ-субмеридионального простирания в виде редких сейсмогеодинамических событий и, возможно, развития зон безрудной низкотемпературной аргиллизации (Петров и др., 2010).

Завершая краткий обзор обстановок формирования рудоносных вулкано-плутонических комплексов, вмещающих месторождения стратегических металлов Южного Приаргунья, следует отметить, что особенно ярко фазы активизации структурообразующих и гидротермальных процессов проявились в поясе развития рудоносных ВТС, являвшихся наиболее активными концентраторами восходящих флюидопотоков. На рис. 3 на примере района Стрельцовской кальдеры рассмотрена динамика развития структурообразующих и гидротермальных процессов в рамках выделенных ТМЦ.

Эпизоды активизации разломных зон кальдеры и ее обрамления подтверждены: индикаторными признаками динамометаморфизма пород; соотношением метасоматитов от ранних высоко-среднетемпературных (грейзенизация, калишпатизация) до поздних низкотемпературных (гидрослюдизация, карбонатизация, аргиллизация); данными термобарогеохимии и микроструктурного анализа; петрофизическими параметрами пород; данными осколковой радиографии и т. д. (Petrov et al., 2013).

Таким образом, рассмотрение обстановок формирования рудоносных вулкано-плутонических комплексов Южного Приаргунья с учетом ранее полученных и новых данных позволяет сделать вывод, что в юрское-раннемеловое время минеральные системы месторождений стратегических металлов формировались в обстановке сочетания остаточного коллизионного геодинамического режима, сопровождавшегося развитием поздних дифференциатов (риолитов)

ТЕКТОНОМАГМАТИЧЕСКИЙ ЦИКЛ			
Протерозойский	***Каледонский***	***Герцинский***	***Мезозойская ТМА***
Мигматизация, Калишпатизация Бластез Катаклаз Милонитизация Альбитизация Рассеянная **U минерализация** в гранитоидах Уртуйского массива к СЗ от Стрельцовской кальдеры	Мигматизация Калишпатизация Бластез Катаклаз Милонитизация Динамометаморфизм Сведений о рудной минерализации нет за исключением Досатуевского проявления давидита, вкрапленности REE-Th- и Y-уранинита к СВ и СЗ от кальдеры, проявлений **грейзенов** на разных участках территории Южного Приаргунья (Чир-Кайластуй, Ботогойтуй)	Калишпатизация Альбитизация **Грейзенизация** с турмалином и флюоритом, непром. Sn-минерализация (м-ния Иргатуй, Аргунское, Кличка, граниты м-ния Антей), вкрапленность давидита, сульфидов, монацита, паризита Магнезиальные **скарны** и апоскарновые ассоциации, непром. вкрапленность сульфидов, Th-уранинита, молибденита, ортита (м-ние Аргунское) Бластез, Катаклаз Милонитизация Серицитизация	Слабопроявленная **грейзенизация** с Sn-W минерализацией (Кир-Киринский массив, м-ния Аргунское, Жерловое) Катаклаз **Гидрослюдизация** и (на глубоких горизонтах) **березитизация** (в восточной части кальдеры) **Аргиллизация** (в западной части кальдеры) Катаклаз **Альбитизация** рудосопровождающая (только в восточной части кальдеры) Брекчирование Промышленная **Mo-U минерализация** Прожилки и прожилково-метасоматические образования бертьеринового, карбонатного, флюоритового состава с сульфидами, изредка с Be-минерализацией (бертрандит) Пострудная **аргиллизация** иногда при участии Li-тосудита, прожилки позднего флюорита, кальцита, цеолитов
ДАННЫЕ ИЗОТОПНОГО ДАТИРОВАНИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД, МЕТАСОМАТИТОВ И РУД			
U-Pb, Rb-Sr (циркон и валовые пробы, уранинит) **1800-784** Ma	U-Pb, K-Ar, Rb-Sr (циркон, мусковит, уранинит) **486-400** Ma	K-Ar, U-Pb, Rb-Sr (мусковит, циркон, уранинит) **317-235** Ma (флогопит) **240** Ma	K-Ar, U-Pb, Rb-Sr (серицит, биотит, мусковит, гидрослюда, настуран, адуляр) **144-126** Ma

Рис. 3. Последовательность проявления структурообразующих и гидротермальных процессов в Приаргунье (район Стрельцовской кальдеры). Сведения об изотопных возрастах приведены по собственным данным и из архивов лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН, а также из многочисленных публикаций (Андреева и др., 2020)

магматической латитовой серии (шахтаминский комплекс), и рифтогенного, в процессе которого происходило внедрение интрузий плюмазитовых лейкогранитов кукульбейского комплекса. Субщелочные магматиты латитовой серии (шахтаминский комплекс) характеризуются Au, Cu–Mo, Pb–Zn–Ag металлогенической специализацией, с вулкано-плутоническими комплексами (приаргунская и тургинская серии) связаны Mo–U, Pb–Zn и флюоритовые руды в вулканических постройках, а с Li–F гранитоидами кукульбейского комплекса объекты с Sn–W–Li–Ta спектром оруденения.

Полученные данные могут быть использованы для оценки перспектив проявления Pb–Zn–Ag и Cu–Mo минеральных систем в мезозойских вулкано-плутонических комплексах Приаргунья, например, в пределах Куйтунской ВТС, расположенной в непосредственной близости с площадкой ПАО «ППГХО».

Работы проведены при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018 (соглашение 075-15-2020-802).

Литература

1. Андреева О. В., Петров В. А., Полуэктов В. В. Мезозойские кислые магматиты Юго-Восточного Забайкалья: петрогеохимия, связь с метасоматизмом и рудообразованием // Геология рудных месторождений, 2020. – Т. 62. – № 1. – С. 76–104.
2. Андреева О. В., Головин В. А. Метасоматические процессы на месторождениях мезозойских областей внутриплитной магматической активизации (Восточная Монголия, Забайкалье) // Геология рудных месторождений, 2001. – № 3. – С. 227–242.
3. Берзина А. П., Берзина А. Н., Гимон В. О. и др. Шахтаминская Mo-порфировая рудно-магматическая система (Восточное Забайкалье): возраст, источники, генетические особенности // Геология и геофизика, 2013. – Т. 54. – № 6. – С.764–786.
4. Геологическое строение Читинской области. Объяснительная записка к геологической карте масш. 1 : 500000. Отв. ред. И. Г. Рутштейн, Н. Н. Чабан. – Чита: Читагеологосъемка, 1997. – 239 с.
5. Голубев В. Н. Возраст рассеянной урановой минерализации в породах обрамления Стрельцовского урановорудного поля и Ямского участка (Восточное Забайкалье) // Геология рудных месторождений, 2011. – Т. 53. – № 5. – С. 450–461.
6. Ищукова Л. П., Модников И. С., Сычев И. В. и др. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. – Иркутск: ГК «Геологоразведка», 2007. – 260 с.
7. Коваленко Д. В., Петров В. А., Полуэктов В. В., Агеева О. А. Геодинамические условия формирования мезозойских вулканических пород Стрельцовской кальдеры // Доклады Академии наук, 2014. – Т. 457. – № 5. – С. 564–567.
8. Коваленко Д. В., Петров В. А., Полуэктов В. В., Агеева О. А. Геодинамическая позиция мезозойских мантийных пород Стрельцовской кальдеры (Восточное Забайкалье), мантийные домены Центральной Азии и Китая // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2015. – № 4. – Вып. № 28. – С. 231–246.
9. Козлов В. Д., Ефремов С. В. Калиевые щелочные базальтоиды и вопросы геохимической специализации сопряженных с ними редкометальных гранитов // Геология и геофизика, 1999. – Т. 40. – № 7. – С. 989–1002.
10. Козлов В. Д., Ефремов С. В., Дриль Г. П. и др. Геохимия, изотопная геохронология и генетические черты верхнеундинского гранитоидного батолита (Восточное Забайкалье) // Геохимия, 2005. – № 44. – С. 408–424.
11. Костицын Ю. А., Коваленко В. И., Ярмолюк В. В. Rb–Sr изохронное датирование штока онгонитов Ары-Булак (Восточное Забайкалье) // Доклады Академии наук, 1995. – Т. 343. – № 3. – С. 381–384.
12. Костицын Ю. А., Зарайский Г. П., Аксюк А. М. и др. Rb–Sr изотопные свидетельства генетической общности биотитовых и Li-F гранитов на примере месторождений Спокойнинское, Орловское и Этыкинское (Восточное Забайкалье) // Геохимия, 2004. – № 9. – С. 940–948.
13. Перетяжко И. С., Савина Е. А., Дриль С. И. и др. Rb–Sr изотопная система и особенности распределения Rb и Sr в породах массива онгонитов Ары-Булак, образованных при участии процессов фторидно-силикатной магматической несмесимости // Геология и геофизика, 2011. – Т. 52. – № 11. – С. 1776–1789.
14. Петров В. А., Леспинас М., Хаммер Й. Тектонодинамика флюидопроводящих структур и миграция радионуклидов в массивах кристаллических пород // Геология рудных месторождений, 2008. – Т. 50. – № 2. – С. 99–126.
15. Петров В. А., Сим Л. А., Насимов Р. М., Щукин С. И. Разломная тектоника, неотектонические напряжения и скрытое урановое оруденение в районе Стрельцовской кальдеры // Геология рудных месторождений, 2010. – Т. 52. – № 4. – С. 310–320.
16. Петров В. А., Андреева О. В., Полуэктов В. В., Коваленко Д. В. Тектономагматические циклы и геодинамические обстановки формирования ру-

доносных систем Южного Приаргунья // Геология рудных месторождений, 2017. – Т. 59. – № 6. – С. 445–469.
17. Рыбалов Б. Л. Пространственное размещение позднемезозойских рудных месторождений в Восточном Забайкалье (Россия) // Геология рудных месторождений, 2002. – Т. 44. – № 4. – С. 354–368.
18. Сасим С. А., Чуканова В. С., Ильина Н. Н., Семенова Ю. В., Ощепкова А. В. Геохимия вулканических пород позднемезозойской рифтогенной ассоциации Александрово-Заводской впадины (Юго-Восточное Забайкалье) // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле», 2012. – Т. 5. – № 2. – С. 209–228.
19. Соловьев Н. С., Шатков Г. А., Якобсон Л. Н. и др. Приаргунско-Монгольский вулканический пояс // Геология и геофизика, 1977. – № 3. – С. 20–31.
20. Сырицо Л. Ф., Баданина Е. В., Абушкевич В. С. и др. Вулканоплутонические ассоциации кислых пород в пределах редкометальных рудных узлов Забайкалья: геохимия пород и расплавов, возраст, P–T условия кристаллизации // Петрология, 2012. – Т. 20. – № 6. – С. 622–648.
21. Таусон Л. В. Геохимия и металлогения латитовых серий // Геология рудных месторождений, 1982. – № 3. – С. 3–14.
22. Чернышев И. В., Прокофьев В. Ю., Бортников Н. С. и др. Возраст гранодиорит-порфиров и березитов Дарасунского золоторудного поля (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений, 2014. – Т. 56. – № 1. – С. 3–18.
23. Шатков Г. А., Соловьев Н. С., Шаткова Л. Н., Якобсон Л. Н. Основные закономерности развития Монголо-Приаргунского пояса и особенности химизма вулканических пород // Геология и полезные ископаемые МНР. – М.: Недра, 1980. – С. 35–55.
24. Шатков Г. А., Бережная Н. Г., Лепехина Е. Н. и др. U–Pb (SIMS SHRIMP II) возраст вулканических образований Тулукуевской кальдеры (Стрельцовский ураново-рудный узел, Восточное Забайкалье) // Доклады Академии наук, 2010. – Т. 432. – № 3. – С. 360–364.
25. Ярмолюк В. В., Коваленко В. И., Сальникова Е. Б., Будников С. В., Ковач В. П. Тектономагматическая зональность, источники магматических пород и геодинамика раннемезозойской Монголо-Забайкальской магматической области // Геотектоника, 2002. – № 4. – С. 293–311.
26. Delvaux D., Moeys R., Spatel G. et al. Palaeostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part I. Palaeozoic and Mesozoic pre-rift evolution // Tectonophysics, 1995. – № 252. – P. 61–101.
27. Pearce J. A., Harris N. B. W., Tindle A. G. Trace element distribution diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // J. Petrol, 1984. – № 25. – P. 956–983.
28. Petrov V. A., Lespinasse M., Poluektov V. V., Cuney M., Nasimov R. M., Hammer J., Schukin S. I. Stress-time context of fault permeability at the Krasnokamensk Area, SE Transbaikalia // Journal of Physics: Conference Series, 2013. – V. 416. 6 p.
29. Petrov V. A., Andreeva O. V., Poluektov V. V. Pathways and conditions of hydrothermal solution transfer into the ore deposition zone // Mineral resources in a sustainable world. Proceedings of the Biennial 13th SGA Meeting. – Nancy, France., 2015. – Vol. 5. – P. 1867–1870.
30. Tang J., Xu W.L., Wang F., Zhao S., Wang W. Early Mesozoic southward subduction history of the Mongol-Okhotsk oceanic plate: Evidence from geochronology and geochemistry of Early Mesozoic intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China // Gondwana Research, 2016. – № 31. – P. 218–240.

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛИ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ ПУНКТА ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ДЛЯ ПРОГНОЗНЫХ РАСЧЕТОВ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧЕЛОВЕКА

А. В. Понизов, А. С. Мишагина, Д. В. Мурлис

ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»
Москва, Россия, mishagina@secnrs.ru

SENSITIVITY ASSESSMENT OF A SIMULATION MODEL OF RADIONUCLIDES RELEASE FROM A NEAR SURFACE RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL FASILITY USED FOR PREDICTIVE CALCULATIONS OF RADIATION EXPOSURE ON HUMAN

A. V. Ponizov, A. S. Mishagina, D.V. Murlis

Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (SEC NRS)
Russian Federation, Moscow, mishagina@secnrs.ru

Some properties of engineered barrier system of near surface waste disposal facilities (NSDF) are characterized by significant uncertainties, which may result in large uncertainties in the results of NSDF simulation models. One of the tools used for assessment of model results uncertainties is the sensitivity assessment of the simulation models. This article presents the results of sensitivity assessment of a simulation model of radionuclide release from the reference NSDF. The significance of model parameters is determined, and proposals for reducing of uncertainty results of NSDF simulation models are given.

Введение

ФБУ «НТЦ ЯРБ» в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года» выполняет работу по созданию моделей пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО) с целью их использования для получения независимых прогнозных оценок долговременной безопасности ППЗРО.

При разработке моделей ППЗРО используются программы для ЭВМ разного уровня сложности, прошедшие экспертизу (аттестацию) в установленном порядке [1].

Для консервативных оценок, проводимых при экспертизе обоснований безопасности ППЗРО, используются расчетные модели, разработанные с помощью программы для ЭВМ Ecolego [2], в которой для выполнения прогнозных расчетов миграции радионуклидов из ППЗРО в окружающую среду используется метод камерного моделирования. Адекватность разрабатываемых расчетных моделей ППЗРО обеспечивается путем валидации, калибровки, а также кросс-верификации моделей, разработанных с помощью разных программ для ЭВМ.

В соответствии с требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов» (НП-100-17) [3], результаты прогнозных расчетов должны учитывать неопределенности исходных данных.

Одним из средств, используемых в моделировании для оценки неопределенностей, является оценка чувствительности расчетной модели. Оценка чувствительности расчетных моделей ППЗРО является в настоящее время стандартной процедурой [4, 5]. Она позволяет проверить корректность расчетной модели ППЗРО, а также выявить параметры, значения которых требуют уточнения.

В настоящей статье представлены результаты оценки чувствительности расчетной модели миграции радионуклидов из референтного ППЗРО, определена значимость входных параметров модели и даны рекомендации по снижению неопределенности результатов расчетной модели ППЗРО.

1. Концептуальная модель ППЗРО

В качестве референтного ППЗРО рассмотрена система, состоящая из следующих элементов [6]:

- ближней зоны, в которую входит область источника радионуклидов и система инженерных барьеров безопасности ППЗРО;
- дальней зоны, в которую входит вмещающая геологическая среда, включая горизонт подземных вод, состояние и характеристики которых влияют на миграцию радионуклидов, вышедших из ближней зоны ППЗРО;

• биосферы, в которой возможна миграция радионуклидов (например, часть атмосферы, почвы, поверхностные воды, растительный и животный мир), включая элементы непосредственного окружения населения, живущего в зоне, в которой оно может подвергнуться радиационному воздействию ППЗРО.

В референтном ППЗРО в качестве инженерных барьеров безопасности рассматриваются стенки контейнеров толщиной 0,15 м, бетонные сооружения стен, перекрытий и основания ППЗРО, глиняный подстилающий экран толщиной 1 м.

Миграция радионуклидов из ППЗРО обусловлена выходом радионуклидов из упаковок РАО со скоростью 10^{-4} 1/год [7] в результате выщелачивания с водой, попадающей в ППЗРО с атмосферными осадками. Дальнейший выход радионуклидов из ППЗРО обусловлен процессами массопереноса в системе инженерных барьеров безопасности ППЗРО, для описания которых используются такие входные параметры как коэффициенты распределения радионуклидов, коэффициенты фильтрации в материалах инженерных барьеров безопасности, пористость и плотность.

С целью выявления наиболее значимых параметров расчетной модели референтного ППЗРО выполнена оценка чувствительности результатов расчетной модели ППЗРО к изменению ее входных параметров.

2. Оценка чувствительности расчетной модели ППЗРО

Расчетная модель миграции радионуклидов из ППЗРО в окружающую среду разработана с использованием программы для ЭВМ Ecolego 6.

Оценка чувствительности результатов расчетной модели референтного ППЗРО к изменению ее входных параметров выполнялась путем проведения вариантных расчетов с использованием функционала программы для ЭВМ Ecolego 6 для следующих условий:

• учитывались следующие инженерные барьеры: бетонные сооружения стен, перекрытия и основание ППЗРО, глиняный подстилающий экран в основании ППЗРО;

• для расчетов выбран долгоживущий радионуклид ^{238}U, поведение которого существенно зависит от формы нахождения и геохимических условий [8, 9];

• искомым параметром (результатом расчетов) является значение потока ^{238}U из ближней зоны ППЗРО в дальнюю зону.

На первом этапе оценки чувствительности расчетной модели ППЗРО составлен перечень параметров, неопределенность которых может влиять на результат расчета. Эти параметры имеют статистическую природу, что требует задания для них функций распределения вероятности. При этом выбор функции распределения основывался на экспертной оценке.

В таблице 1 на основании литературных данных [6, 10, 11, 12, 13] приведен перечень учитываемых входных параметров расчетной модели, влияющих на результат расчета, диапазоны изменения значений параметров, и типы функций их вероятностного распределения.

Вариантные расчеты проводились с использованием метода «латинский гиперкуб». Этот метод по сравнению с методом «Монте-Карло» позволяет уменьшить количество вариантных расчетов, не снижая точности оценок влияния неопределенности параметров расчетной модели на результат расчета, и применяется в тех случаях, когда результат расчета является монотонной функцией от параметров расчетной модели [14].

Таблица 1. Характеристики параметров расчетной модели ППЗРО

Наименование параметра расчетной модели	Диапазон изменения параметра расчетной модели	Тип функции распределения параметра расчетной модели
Коэффициент распределения радионуклида в бетоне, K_d, $м^3/кг$	0,1–5	Равномерное
Коэффициент распределения радионуклида в глине, K_d, $м^3/кг$	$7 \cdot 10^{-4}$ – 67	Равномерное
Пористость бетона, [–]	0,14–0,16	Равномерное
Пористость глины, [–]	0,33–0,6	Равномерное
Плотность бетона, $кг/м^3$	2300–2600	Треугольное
Плотность глины, $кг/м^3$	2500–2700	Треугольное
Коэффициент фильтрации бетона, м/год	0,365–365	Равномерное
Коэффициент фильтрации глины, м/год	0,00365–0,365	Равномерное

В качестве показателя чувствительности модели к исходным данным используется коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Размер выборки, использованной при оценке, составил 5000 значений для каждого входного параметра. Результаты оценки чувствительности расчетной модели референтного ППЗРО представлены на рисунке 1.

Графики на рисунке 1 демонстрируют, что результаты прогнозных расчетов потока ^{238}U из ближней зоны ППЗРО в большей степени чувствительны к коэффициенту распределения ^{238}U в бетонных барьерах и глиняном экране и мало чувствительны ко всем другим параметрам расчетной модели референтного ППЗРО.

Для оценки количественного вклада входных параметров расчетной модели ППЗРО в неопределенность результата использовался метод EFAST (Extended Fourier amplitude sensitivity testing) [15], который относится к вариационным методам анализа чувствительности. Использование метода EFAST предполагает получение индексов первого порядка (S_1) и индексов полного вклада (S_{Total}) для каждого входного параметра, обладающего неопределенно-

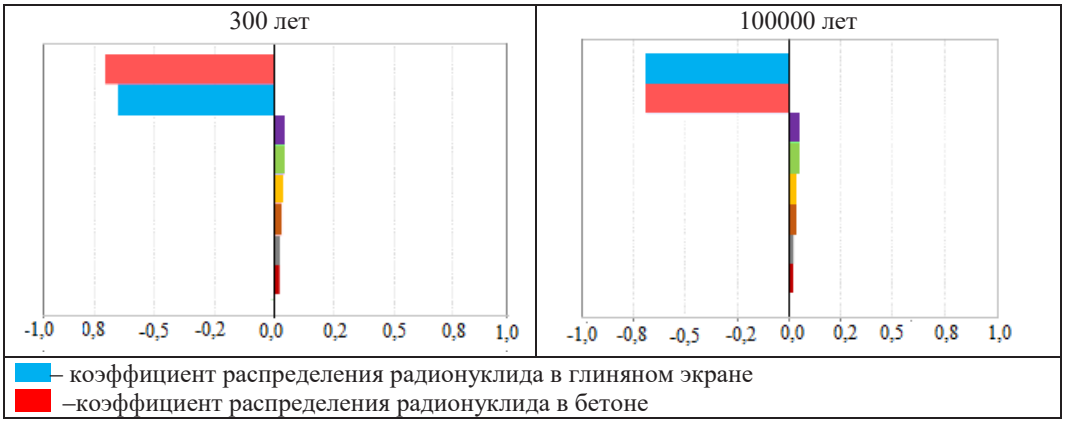


Рис. 1. График «торнадо», показывающий значения коэффициентов ранговой корреляции Спирмена (SRC), полученные для потока ^{238}U из ближней зоны ППЗРО

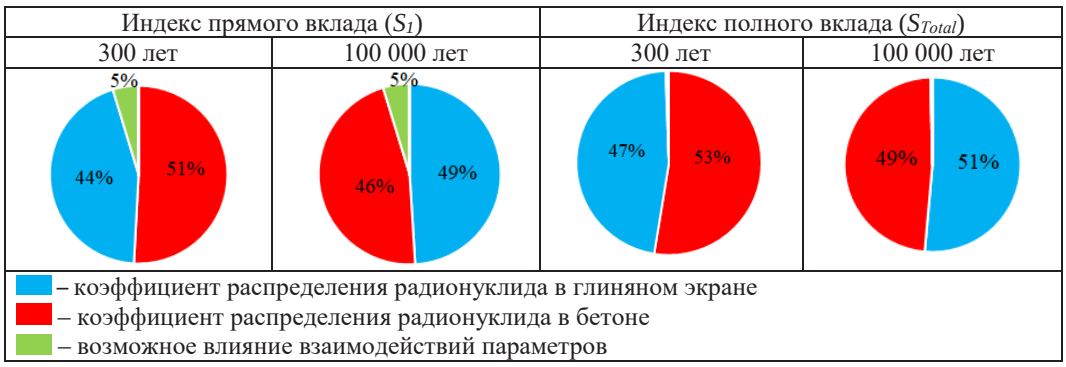


Рис. 2. Прямой и полный вклад параметров модели в неопределенность потока ^{238}U из инженерных барьеров безопасности

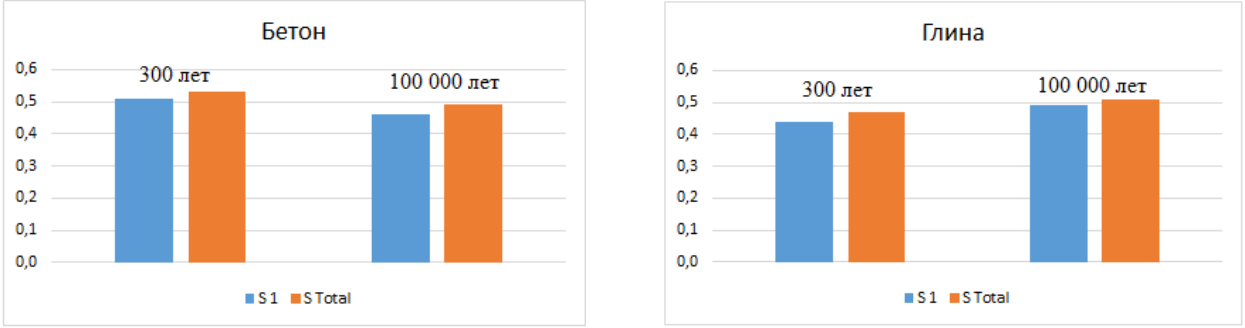


Рис. 3. Индексы прямого и полного вклада параметров модели в неопределенность потока ^{238}U из ближней зоны ППЗРО

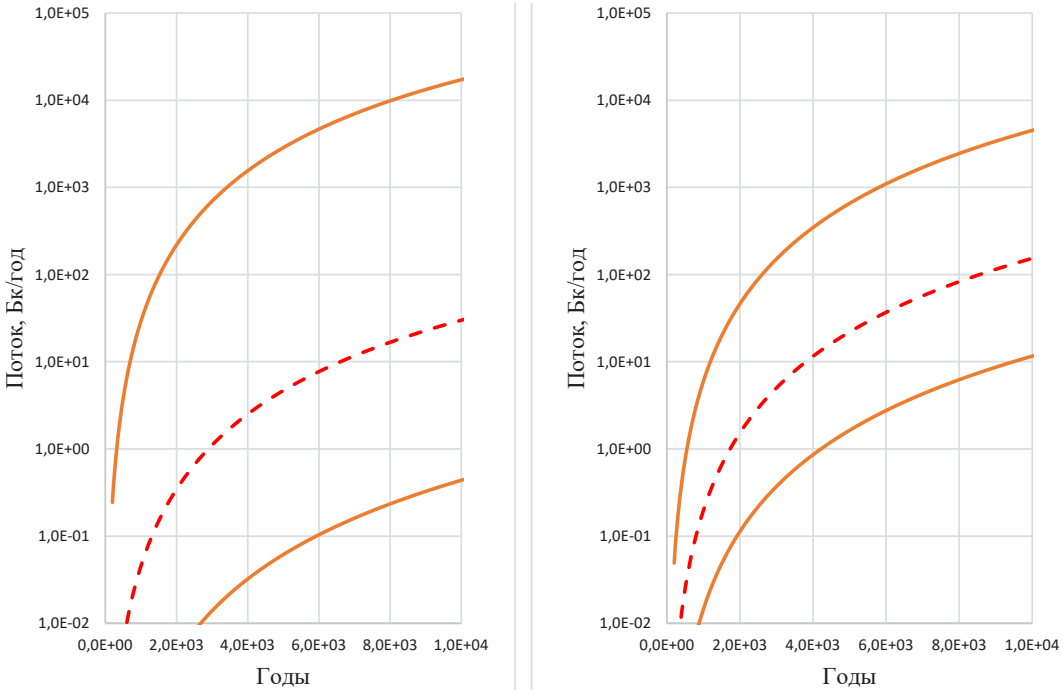


Рис. 4. Разброс значений потока ^{238}U из ближней зоны ППЗРО в зависимости от времени при уменьшении диапазона изменения наиболее значимых входных параметров

стью. Индексы первого порядка измеряют прямой вклад параметра в неопределенность результата. Индексы полного вклада помимо прямого вклада параметра учитывают также влияние взаимодействия параметров [16].

Полученные диаграммы индекса прямого вклада, приведенные на рисунке 2, свидетельствуют о том, что вклад в неопределенность результата коэффициента распределения ^{238}U в бетоне меняется со временем от 51 % до 46 %, в глиняном экране – от 44 % до 49 %. При этом на более поздних временах роль коэффициента распределения ^{238}U в глиняном экране увеличивается.

Результаты оценки индексов S_1 и S_{Total} параметров расчетной модели ППЗРО в вариацию потока ^{238}U из ближней зоны ППЗРО, оцениваемых методом EFAST в момент времени 300 и 10^5 лет приведены на рисунке 3.

Для наиболее значимых параметров (коэффициенты распределения ^{238}U в бетоне и глиняном экране) было исследовано влияние диапазона изменения входных параметров расчетной модели ППЗРО на неопределенность результата. Для этого были уменьшены интервалы изменения значений входных параметров: для коэффициента распределения ^{238}U в бетоне взят интервал 1–3 м^3/кг, в глиняном экране – 0,07–6,7 м^3/кг. Результаты расчетов, выполненных с учетом изменения значений входных параметров, приведены на рисунке 4.

Результаты расчетов показывают, что уменьшение диапазона изменения значений наиболее значимых входных параметров расчетной модели ППЗРО привело к уменьшению неопределенности результата моделирования (от нескольких раз до порядка).

Заключение

Оценка чувствительности расчетной модели ППЗРО может использоваться в качестве инструмента, позволяющего выявить значимые параметры, влияющие на результаты моделирования миграции радионуклидов из ППЗРО, и способствовать уменьшению неопределенности результатов моделирования.

По результатам проведенных в статье исследований можно сделать следующие выводы:

- наиболее значимыми параметрами, определяющими поток ^{238}U из ближней зоны ППЗРО, являются коэффициенты распределения ^{238}U в бетонных барьерах и глиняном подстилающем экране;
- значимость указанных входных параметров сохраняется весь период моделирования;
- уменьшение диапазона изменения входных параметров расчетной модели позволяет существенно уменьшить неопределенность результата моделирования.

Представленные результаты продемонстрировали, что использование литературных данных в широком диапазоне значений может значительно увеличить неопределенность результатов расчетов. Для получения более точных результатов необходимо в расчетных моделях ППЗРО использовать значения входных параметров, подтвержденных экспериментально.

Литература

1. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30 июля 2018 г. № 325 «Об утверждении Порядка проведений экспертизы программ для электронных вычислительных машин, используемых в целях построения расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии и (или) видов деятельности в области использования атомной энергии».
2. Ecolego User Guide. Facilia AB. 17 Feb 2015.
3. НП-100-17 «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов».
4. РБ-117-16 «Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов».
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, No. SSG-23, IAEA, Vienna (2012).
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities: Results of a Coordinated Research Project, Vol. 1, 2, IAEA, VIENNA (2004).
7. НП-093-14 «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения».
8. M. H. Bradbury and F.-A. Sarott. Sorption Databases for the Cementitious Near-Field of a L/ILW Repository for Perfomance Assessment.1995.
9. Арбузов С. И. Геохимия радиоактивных элементов, Томск, 2010.
10. Understanding variation in partition coefficient, Kd, values. Volume II: Review of Geochemistry and Available Kd Values for Cadmium, Cesium, Chromium, Lead, Plutonium, Radon, Strontium, Thorium, Tritium (3H), and Uranium August 1999.
11. Charles R. Fitts Groundwater Science. Academic Press. San Diego, California, USA, 2002, ISAM.
12. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments Vienna: International Atomic Energy Agency. Technical reports series No. 472, ISSN 0074–1914, 2010.
13. Porosity and Permeability, Gartell, J.E. et. al. Arlington, VA: National Science Teachers Association, 1992.
14. Богдан С. Н., Ковалевич О. М., Козлова Н. А., Шевченко С. А. «Об оценке погрешностей расчетов, выполняемых при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии», Ядерная и радиационная безопасность № 2 (84), 2017.
15. Per-Anders Ekström Eikos A Simulation Toolbox for Sensitivity Analysis, 2005.
16. Сборник трудов XX научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, проходившей 12–13 сентября 2019 г. – (Препринт / Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, сентябрь 2019, № IBRAE-2019-02). – М. ИБРАЭ РАН, 2019. – 168 с.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПУНКТОВ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

А. В. Понизов, К. А. Лебедкин, П. М. Верещагин

ФБУ «НТЦ ЯРБ»
Москва, Россия, lebedkin@secnrs.ru

IMPROVEMENT OF APPROACHES TO ASSESSMENT OF LONG-TERM SAFETY OF DEEP DISPOSAL FACILITIES FOR LIQUID RADIOACTIVE WASTE

A. V. Ponizov, K. A. Lebedkin, P. M. Vereshchagin

SEC NRS
Moscow, Russia, lebedkin@secnrs.ru

Some approaches to hydrogeological modeling, which is used in the long-term safety assessment of radioactive waste (RW) disposal systems, are demonstrated on the example of development of a three-dimensional geofiltration-geomigration model of the liquid radioactive waste deep disposal facility (LRW DDF) in the city of Dimitrovgrad.
The development of the LRW DDF model was preceded by: analysis of data obtained in the course of research to clarify the processes occurring in the RW disposal system; analysis of possible evolution scenarios of the RW disposal system; development of conceptual models of a RW disposal system for various evolution scenarios.
Rostechnadzor recommendations for the long-term safety assessment of LRW DDF were used in the development of approaches to hydrogeological modeling of LRW DDF, in conducting studies within the framework of the implementation of the IAEA mission recommendations to justify safety of LRW DDF, as well as in the development of an integrated approach to justification the long-term safety of LRW DDF.

Введение

В Российской Федерации практика захоронения жидких радиоактивных отходов (далее – ЖРО) путем контролируемого нагнетания в глубокие геологические горизонты реализуется на трех пунктах глубинного захоронения ЖРО (далее – ПГЗ ЖРО), расположенных в г. Железногорск (Красноярский край), г. Северск (Томская область) и г. Димитровград (Ульяновская область). Применение данного метода захоронения позволило обеспечить безопасную изоляцию ЖРО, образующихся на предприятиях атомной отрасли.

В 2013 году была проведена миссия МАГАТЭ «Международное экспертное рассмотрение практики глубокой закачки жидких радиоактивных отходов в Российской Федерации» (далее – миссия МАГАТЭ) основная задача которой заключалась в оценке соответствия российских подходов и процедур по обоснованию долговременной безопасности ПГЗ ЖРО международным стандартам [3].

Группа международных экспертов отметила, что с момента начала практики глубинного захоронения ЖРО в 1960-х годах Российская Федерация непрерывно работает над повышением уровня обеспечения безопасности ПГЗ ЖРО и улучшением понимания процессов, происходящих в системе захоронения радиоактивных отходов (далее – РАО), а также эволюции данной системы. Было отмечено, что Российской Федерацией осуществляются мероприятия для последовательного перехода к практике отверждения ЖРО для их захоронения, а также реализуются программы, направленные на минимизацию образования РАО, что является положительным моментом и соответствует международной практике [4]. При этом группа экспертов МАГАТЭ с целью дальнейшего совершенствования обоснования безопасности технологии глубинного захоронения ЖРО рекомендовала:

- привести описание основных характеристик района размещения и площадки ПГЗ ЖРО, а также процессов, лежащих в основе функций безопасности;
- представить результаты исследований и испытаний (экспериментов), необходимые для понимания эволюции системы захоронения РАО;
- разработать сценарии эволюции ПГЗ ЖРО (включая альтернативные), учитывающие геологические и климатические изменения;
- прогнозные расчеты выполнять в 3D моделях геологической среды;
- выполнить качественную и количественную оценку безопасности системы захоронения РАО;
- разработать детальную концепцию закрытия ПГЗ ЖРО с учетом сроков сохранения изолирующих свойств инженерных барьеров безопасности.

Совершенствование нормативно-правового обеспечения обоснования безопасности ПГЗ ЖРО

С целью реализации программы по совершенствованию нормативно-правового обеспечения обоснования безопасности ПГЗ ЖРО «Программа расчетно-экспериментальных исследований по обоснованию и оценке долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов в целях реализации рекомендаций миссии МАГАТЭ «Международное экспертное рассмотрение практики глубокой закачки жидких радиоактивных отходов в Российской Федерации» и обоснования концепции их закрытия», силами ФБУ «НТЦ ЯРБ» по заданию Ростехнадзора было разработано руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Состав и содержание отчета по обоснованию безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов» (РБ-139-17) (далее – руководство по безопасности) [10], при разработке которого были учтены положения документов МАГАТЭ по обоснованию безопасности пунктов захоронения РАО [6, 7, 8].

Согласно положениям, рассмотренным в главе 6 руководства по безопасности [10], оценку долговременной безопасности ПГЗ ЖРО рекомендуется выполнять путем проведения численного прогнозного расчета радиационного воздействия компонентов РАО на население и окружающую среду, обусловленного их распространением в геологической среде с учетом периода потенциальной опасности захороненных РАО. При оценке радиационного воздействия ПГЗ ЖРО на население рекомендуется учитывать все пути формирования внутреннего и внешнего облучения по всем дозообразующим радионуклидам, содержащимся в РАО. Численный прогнозный расчет рекомендуется выполнять при нормальном (эволюционном) протекании естественных процессов на ПГЗ ЖРО, а также при маловероятных (катастрофических) внешних воздействиях природного и техногенного характера, включая непреднамеренное вторжение человека в систему захоронения РАО. Таким образом, в руководстве по безопасности [10] представлен основной метод оценки долговременной безопасности ПГЗ ЖРО заключаемый в последовательной реализации следующих задач:

- разработка и обоснование сценариев эволюции системы захоронения РАО;
- создание концептуальной модели системы захоронения РАО;
- реализация расчетной модели и выполнение оценки долговременной безопасности ПГЗ ЖРО с учетом дополнительных данных, полученных в ходе исследований процессов, происходящих в системе захоронения РАО.

Реализация требований нормативных документов для обоснования безопасности ПГЗ ЖРО

Примером учета рекомендаций миссии МАГАТЭ и нормативных документов Российской Федерации служит разработанная трехмерная гидрогеологическая модель ПГЗ ЖРО в г. Димитровград (далее – ПГЗ ЖРО «Димитровградский»), реализованная специалистами ФБУ «НТЦ ЯРБ» с помощью программы для ЭВМ GeRa [2].

Для оценки безопасности ПГЗ ЖРО «Димитровградский» были отобраны наиболее вероятные сценарии эволюции системы захоронения РАО, а также относительно маловероятные сценарии, но которые могут иметь серьезные последствия с точки зрения облучения человека:

- Нормальный сценарий эволюции системы захоронения РАО;
- Сценарий вертикальных перетоков компонентов РАО по заколонному пространству скважин из эксплуатационного горизонта в вышележащие водоносные горизонты;
- Сценарий ускоренной миграции компонентов РАО в эксплуатационном горизонте;
- Сценарий активизации тектонического нарушения (Мелекесского разлома);
- Сценарий добычи флюидов за пределами горного отвода недр (далее – ГОН);
- Сценарий бурения глубокой скважины со вскрытием области локализации РАО.

ПГЗ ЖРО «Димитровградский» находится на территории крупного артезианского бассейна. Области питания и разгрузки эксплуатационных горизонтов вмещающие компоненты РАО находятся на значительном удалении от ПГЗ ЖРО. Моделирование режима всего артезианского бассейна в данном случае является не целесообразным, поскольку масштаб такой модели не позволит получить результаты с необходимой точностью. Адекватным решением явилось построение модели-врезки (рисунок 1), где плановые границы области моделирования зависят от гидравлического влияния ПГЗ ЖРО «Димитровградский» вследствие нагнетания ЖРО. Оценка размера области моделирования базируется на предварительном расчете расстояния распространения компонентов РАО, которое основано на определении действительной скорости фильтрации. Прямоугольная форма и поворот фигуры необходимы для корректного задания направления естественного потока подземных вод эксплуатационных горизонтов.

Разбивка разреза на модельные слои принята по гидрогеологической стратификации и классификации района размещения ПГЗ ЖРО «Димитровградский» представлена в таблице 1 [12].

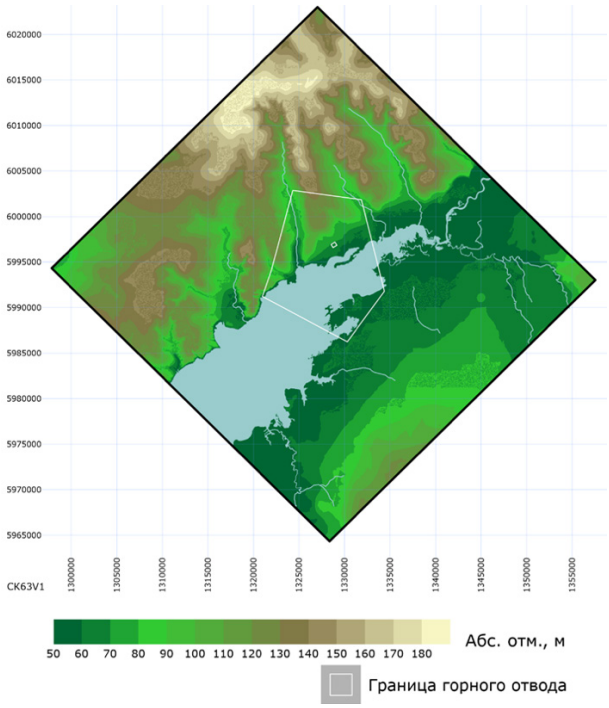


Рис. 1. Граница области моделирования ПГЗ ЖРО «Димитровградский»

В вертикальном плане область моделирования ограничена сверху поверхностью земли, снизу – подошвой III горизонта.

Ранее выполненными работами [12], выявлено, что компоненты РАО распространяются в эксплуатационных горизонтах не по всей толще, а по маломощным зонам. По данным литологического строения для IV водоносного комплекса характерно преобладание проницаемых зон в центральной части разреза, для III комплекса – в верхней половине разреза. Было выполнено дополнительное разбиение эксплуатационных горизонтов ПГЗ ЖРО «Димитровградский» на подслои, в каждом из которых задавались геофильтрационные и геомиграционные параметры.

Построение геометрии слоев велось на основе топографических карт, а также использовались данные по скважинам ПГЗ ЖРО «Димитровградский», дополнительно использовались данные по скважинам нефтегазовых месторождений, расположенных вблизи ПГЗ ЖРО «Димитровградский», а также данные по региональным разведочным скважинам. Поскольку исходная информация о геологических слоях собирается по ограниченному количеству точек (скважин), информация о других точках пространства была получена с помощью вариограммного анализа.

Область моделирования представляет собой небольшую часть крупного Волго-Камского артезианского бассейна. Данные о гидродинамической обстановке, в частности – о структуре потока подземных вод, представлены для данного участка только в региональном масштабе. В связи с этим граничные условия, схематично показанные на рисунке 2, задавались таким образом, чтобы учесть сложившееся направление и градиент потока подземных вод эксплуатационных горизонтов ПГЗ ЖРО «Димитровградский».

Значения коэффициентов фильтрации в латеральном направлении для водоносных комплексов были определены на основе результатов опытно-фильтрационных работ, представленных в [5]. Вертикальные коэффициенты фильтрации и коэффициенты упругоемкости принимались по литературным данным [1, 9, 11, 13, 14]. Калибровка параметров проводилась ручным подбором в процессе решения стационарной задачи, одновременно корректировались граничные условия.

Миграционные параметры подбирались на основе литературных данных. Калибровка параметров проводилась ручным подбором.

Для модели ПГЗ ЖРО «Димитровградский» основным способом верификации был принят эпигнозный расчет, который позволяет сделать заключение об адекватности и соответствии разработанной модели природным и техногенным условиям. Результаты эпигнозного расчета сопоставляются с данными мониторинга по определенным индикаторам.

Для оценки геофильтрации индикатором являются уровни (давления) в скважинах и их изменение во времени. Индикатором для оценки геомиграции является определенный компонент или группа компонентов РАО, которые имеют характерные миграционные свойства и способны наиболее полно представить протекающие геомиграционные процессы в системе.

Для геомиграционной модели ПГЗ ЖРО «Димитровградский» удельные суммарные активности радионуклидов не могут являться индикаторами по причине того, что такой критерий требует, как минимум, точных сведений о составе захороненных ЖРО за весь период эксплуатации. В качестве индикаторов была использована мощность экспозиционной дозы (далее – МЭД), определенная по результатам гамма-каротажа в стволах скважин, которая меньше всего подвержена вариациям в измерениях, что дает наиболее стабильный результат во времени. Для математического моделирования необходимо учитывать компоненты РАО, которые характеризуются численными параметрами, а не косвенными признаками. Для такого перехода была использована методика определения удельной активности на основе МЭД с помощью коэффициента пересчета.

Стоит отметить, что полученные результаты верификации для геомиграционной модели ПГЗ ЖРО «Димитровградский» дали меньшую сходимость, чем для геофильтрационной. Это является следствием как сложного геологического строения района размещения ПГЗ ЖРО, так и неопределенности геомиграционных параметров.

Таблица 1. Дискретизация разреза

Исходное расчленение	Принятая дискретизация	
Гидрогеологическая стратификация разреза	Номер зоны	Модельный слой
Аллювиальный четвертичный водоносный горизонт (aQ)	VII	1
Водоносные горизонты меловых, юрских, триасовых и татарских отложений (K-J-T-P_3t)	C	2
Казанская слабопроницаемая толща (P_2kz)		
Казанско-ассельский водоносный комплекс (P_2kz–P_1s-as)	VI	3
Верхнекаменноугольная слабопроницаемая толща (C_3)	B	4
Верхне-среднекаменноугольный водоносныйкомплекс (C_3–C_2mc-ks)	V	5
Верейская слабопроницаемая толща (C_2vr)	A	6
Башкирско-окский водоносный комплекс (C_2b–C_1s-ok)	IV	7–26
Яснополянско-малиновский водоносный комплекс (C_1jp-ml)	III	27–36

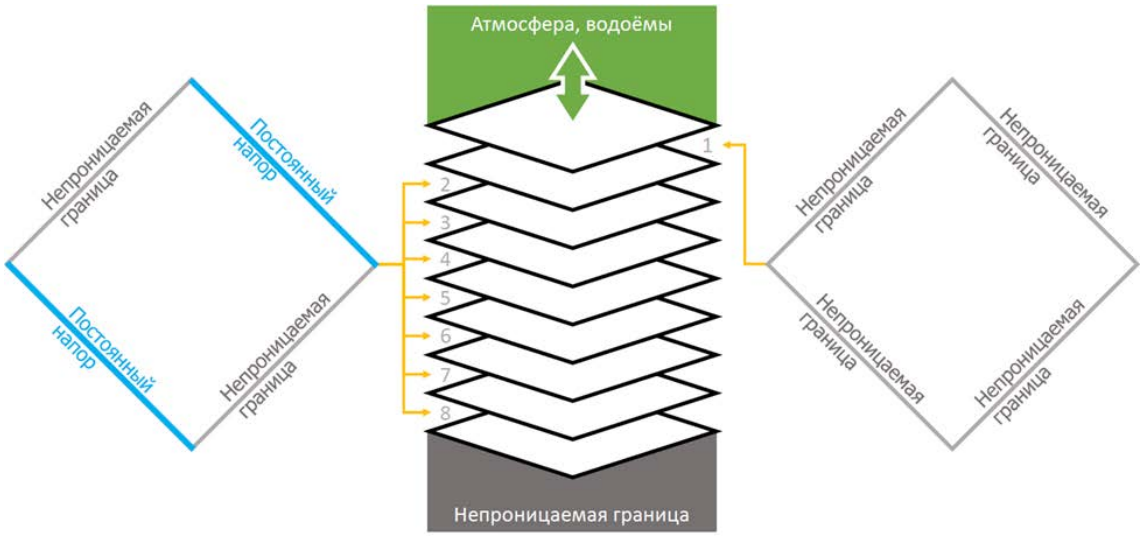


Рис. 2. Граничные условия модели

При прогнозных расчетах на период времени 1 млн. лет в качестве контролируемых показателей использовались радионуклиды, входящие в состав ЖРО, в том числе нейтральный компонент (N) с максимальной концентрацией равной 1.

Оценка долговременной безопасности ПГЗ ЖРО достигалась путем:

- сбора и формализации информации о системе захоронения РАО, в том числе использованием значений исходных данных и входных параметров моделей, полученных и/или подтвержденных экспериментально;
- разработки набора сценариев эволюции системы захоронения РАО, учитывающих рекомендации экспертов МАГАТЭ, а так же перечень исходных событий, установленных в федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии;
- разработки геофильтрационных и геомиграционных моделей ПГЗ ЖРО с использованием программ для ЭВМ, аттестованных в области расчетного обоснования долговременной безопасности ПГЗ ЖРО;
- проведения анализа чувствительности и верификации геофильтрационных и геомиграционных моделей ПГЗ ЖРО.

Результаты прогнозных расчетов, выполненные по разработанным сценариям эволюции системы захоронения РАО ПГЗ ЖРО «Димитровградский» показали, что в течение всего расчетного периода компоненты РАО будут находится в пределах ГОН, а основная доля их концентрации будет сосредоточена вблизи нагнетательных скважин вследствие относительно малого количества захороненных РАО и высокой сорбционной способности геологических отложений.

Заключение

В ходе совершенствования подходов к оценке долговременной безопасности ПГЗ ЖРО с учетом рекомендаций МАГАТЭ разработано руководство по безопасности [10], в котором определены основы проведения численного прогнозного расчета радиационного воздействия компонентов РАО на население и окружающую среду, формирующие единый для всех ПГЗ ЖРО порядок:

- представления основных положений оценки безопасности;
- описания исходных данных;
- разработки и обоснования сценариев эволюции системы захоронения ЖРО;
- разработки и обоснования концептуальных и математических моделей для оценки безопасности ПГЗ ЖРО;
- анализа результатов численных прогнозных расчетов миграции радионуклидов в окружающей среде и оценка воздействия на население и окружающую среду, их сравнение с установленными критериями безопасности.

На примере ПГЗ ЖРО «Димитровградский» показана реализация разработанных подходов, что позволило выполнить качественную и количественную оценку безопасности системы захоронения РАО.

Литература

1. Абрамов С. К., Бабушкин В. Д., Справочное руководство гидрогеолога, т. 1, под ред. В. М. Максимов. – Ленинград: Недра, 1979.
2. Аттестационный паспорт программного средства (GeRa/V1) от 17 апреля 2018 г. № 443.
3. Дорофеев А. Н., Савельева Е. А., Уткин С. С., Понизов А. В. и др. Эволюция обоснования долговременной безопасности ПГЗ ЖРО // Радиоактивные отходы, 2017. – № 1. – С. 54–63. http://www.radwaste-journal.ru/article/18/.
4. International Peer Review of the Deep Well Injection Practice for Liquid Radioactive Waste in the Russian Federation. Final Report of the IAEA International Review Team July 2013, IAEA, Vienna (2020).
5. Материалы обоснования лицензии на эксплуатацию действующего пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов «Опытно-промышленный полигон» филиала «Димитровградский» ФГУП «НО РАО» (г. Димитровград, Ульяновская область), включая материалы оценки воздействия на окружающую среду. Том 1, ФГУП «НО РАО», 2018. http://www.norao.ru/ecology/mol/ (дата обращения 20.04.2021).
6. МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Захоронение радиоактивных отходов, Серия норм безопасности МАГАТЭ № SSR-5, Вена (2011).
7. МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Основополагающие принципы безопасности. Основы безопасности № SF-1, Серия норм по безопасности SF, Вена, (2007).
8. МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ. Оценка безопасности установок и деятельности. Общие требования безопасности № GSR Part 4 (Rev. 1), Вена, (2016).
9. Овчинников А. М., Общая Гидрогеология. – Москва: Недра, 1955.
10. РБ-139-17 Состав и содержание отчета по обоснованию безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов.
11. Румынин В. Г., Геомиграционные модели в гидрогеологии. – Санкт-Петербург: Наука, 2011.
12. Рыбальченко А. И., Пименов М. К., Костин П. П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. – М.: ИздАт, 1994. – 256 с. – УДК: 614.876, ISBN: 5-86656-014-3.
13. G. P. Kruseman, N. A. Ridder, Analysis and evaluation of pumping test data. IRLI Publication 47, 2nd. Wageningen, The Netherlands, 1994.
14. W. C. Walton, Aquifer Test Modeling, CRC Press, 2007.

РАДИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ ПО К И Th – ИНДИКАТОР ПРИ АЭРОГЕОФИЧЕСКИХ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

А. М. Портнов

Российский государственный геологоразведочный университет
Москва. Россия, a.m.portnov@mail.ru

RADIOGEOCHEMICAL SPECIALIZATION IN K AND Th-AN INDICATOR FOR AEROGEOPHICAL PROSPECTING OF DEPOSITS

A. M. Portnov

Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University
Moscow, Russia, a.m.portnov@mail.ru

The author of this article participated in the surface and airborn geophysical surveys of the areas over tens thousands square kilometers within the Okhotsk-Chukotka and Beltau-Kuramin (Uzbekistan) volcanic-plutonic belts, in the North Urals, in the diamond provinces in Yakutia, in Kazakhstan, in the Kola Peninsula, Central Mongolia and other regions of the world. The investigations used data obtained by gamma spectrometers with single-crystal sensors NaI (Tl), including aerial gamma ray spectrometer manufactured by Macfar, Canada, in combination with two-level magnetometer survey.

A bulk of the surface data was collected (more than 200 samples), and a huge bank of remote observation data was accumulated – over a million of observation points, and the contents of K, Th and Bi^{214} (U) was calculated at each point. According to the data processing results, a majority of higher values, commonly interpreted as the ore promising anomalies of the radioactive field of the Earth, is connected with barren rocks typically characterized by a high positive correlation between K and Th. Abundanceof the anomalies greatly worsened the exploration performance. The best informative in relation of liveore prospecting appeared to be the indicator functions describing mutual relations between K and Thin magmatic rocks, on the one hand, and in fluid-hydrothermal metasomatic wallrock, on the other hand. Based on these data, for the first time in the world, the high efficiency of the airborn gamma ray spectrometry has been proved in exploration of the gold and silver deposits in the Okhotsk-Chukotkavolcanic-plutonic belts. The use of UAV and new geological exploration equipment makes it possible to improve efficiency of this express method of live ore prospecting.

Введение

Автор участвовал в производственных наземных и аэрогеофизических работах на сотнях тысяч км^2 в пределах Охотско-Чукотского и Бельтау-Кураминского (Узбекистан) вулкано-плутонических поясов, на Северном Урале, в алмазоносных районах Якутии, в Казахстане, на Кольском полуострове, в Закарпатье, Монголии и других районах. В прошлом веке при поведении аэрогаммаспектрометрической съемки (АГСМ) нами использовались данные, полученные гамма-спектрометрами на основе монокристальных датчиков NaI (Tl), в сочетании с двухуровневой магнитометрической съемкой

Был собран аналитический материал по наземным данным (более 2000 проб) и накоплен большой банк данных дистанционных измерений – более миллиона точек наблюдений, в каждой из которых вычислялось содержание К, Th, Bi^{214} (U). Обработка этих данных показала, что большинство повышенных значений, обычно выделяемых, как рудоперспективные аномалии радиоактивного поля Земли, связано с безрудными магматическими породами, для которых характерна высокая положительная корреляция между Th, U, К. Это явление отмечалось, в частности, в работе (1). Проверка таких аномалий была обязательной по инструкциям МинГео СССР, она отнимала массу времени и сил у наземных геологических партий, но результативность проверок была ничтожной.

Обилие породных аномалий значительно снижало эффективность АГСМ-съемок и удорожало поисково-разведочные работы. К концу 60-гг. прошлого столетия многие геологические управления стали отказываться от аэрогеофизичских работ. Инициатива начальника Магаданского геологического управления И. Е. Драбкина позволила нам в 1967 году начать работы по поиску коренных золото-серебряных месторождений Охотско-Чукотского вулканогенного пояса.

Наиболее информативными для поиска различных рудных месторождений оказались индикаторные функции, отражающие характер взаимоотношений К и Th в магматических породах, с одной стороны, и во флюидно-гидротермальных околорудных метасоматитах рудных месторождений – с другой. На основе этих данных впервые в мире была показана высокая эффективность АГСМ-данных при разведке золото-серебряного месторождения Хаканжа, Карамкен, Дукат, Кубака и других коренных рудных объектов Охотско-Чукотского вулканогенного

пояса (2). В дальнейшем были исследованы рудные поля Бельтау-Кураминского пояса (Узбекистан), а также Северный Казахстан, Закарпатье, Центральная Монголия и другие районы (5).

Результаты исследований и их обсуждение

Составлена таблица 1 на основе 10 интервальных скоррелированных значений содержаний К и Th, характерных для магматических и осадочно-метаморфических безрудных пород земной коры. Эта таблица в координатах содержаний К – Th графически представлена на рис. 1, показывающем высокий положительный коэффициент корреляции (R = 0,85–0,90) между К и Th в интервале содержаний 0,2–3,5 кларка (кларк Th – $12 \cdot 10^{-4}$ %) и 0,2–2,5 кларка для калия (кларк К – 2,5 %). Рисунок отражает «стандарт безрудности» с радигеохимической специализией РГС = 0, что позволяет отбросить значительное количество безрудных «породных» аномалий, куда попадают магматические и метаморфические породы.

При этом выделяются правые и левые поля радиогеохимической специализации по К и Th (РГС > 2). При РГС = О выделяются. безрудные умеренно-щелочные породы, а также гнейсы, кристаллические сланцы, глинистые сланцы, аркозовые песчаники. За пределами поля остаются редкие типы магматических пород – некоторые типы лейкократовых гранитов, ультракалиевые риолиты, сынныриты, нефелиновые сиениты, карбонатиты, кимберлиты. С этими типами пород, обладающими радигнеохимической специализацией, нередко генетически связаны промышленные типы оруденения.

Оклорудная гидротермальная проработка магматических и осадочно-метаморфических пород с образованием разнообразных метасоматитов (рис. 2) неизменно сопровождается уменьшением положительной корреляции между К и Th. Это явление отражает антагонизм в поведении К и Th при формировании метасоматитов (рис. 3, 4): в калиевых метасоматитах микроклинового, кварц-адулярового

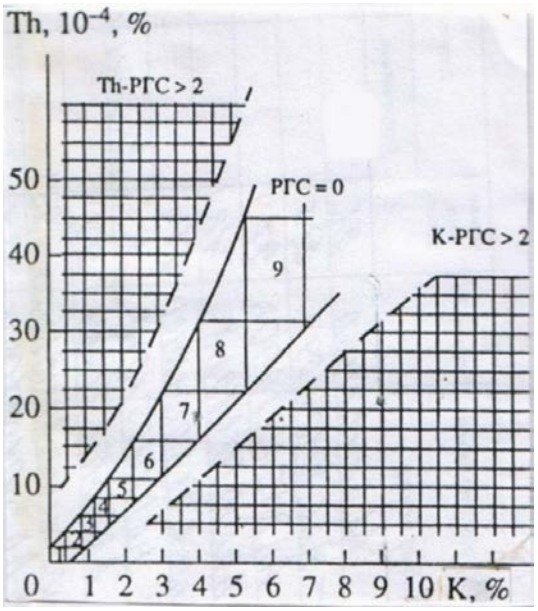


Рис. 1. Набор интервальных значений К и Th (классы 1–9, табл. 1) характеризует «стандарт безрудности» с высокой положительной корреляцией К и Th (R = 0,85–0,90) в магматических и осадочно-метаморфических породах. Поле стандарта с РГС = 0 позволяет нормировать в системе координат К–Th поля рудоперспективных измерений с К-РГС > 2 и Th-РГС > 2 (правые и левые поля диаграммы), а также исключать из проверок высокоактивные породные аномалии с РГС = 0 (центральная часть)

Таблица 1. Скоррелированные значения содержаний К и Th в безрудных магматических и метаморфических породах для определения контура «стандарта безрудности» с РГС = 0 (R = 0,85–0,90)

№ класса	К, %	Th, 10^{-4} %
1	0,4	2
2	0,4–0,8	2–4
3	0,8–1,2	4–6
4	1,2–1,7	6–9
5	1,7–2,2	9–12
6	2,2–3,0	12–16
7	3,0–4,0	16–22
8	4,0–5,2	22–30
9	5,2–7,0	30–45
10	> 7,0	> 45

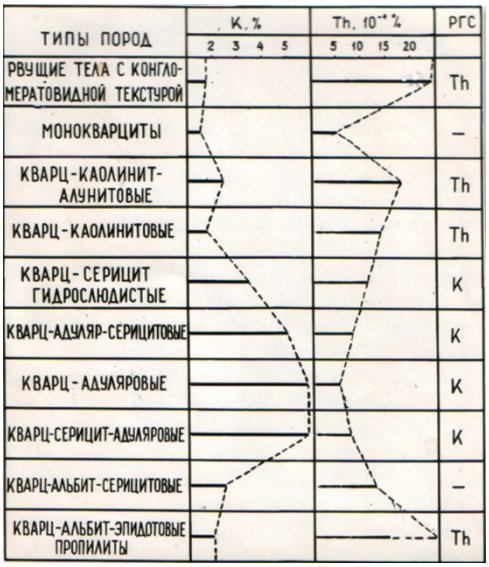


Рис. 2. Вертикальная зональность и проявление К-РГС и Th-РГС в метасоматитах рудных зон золото-серебряных месторождений.Охотско-Чукотского вулканического пояса. Глубина разреза – до 500 м

и кварц-серицитового составов, характерных для золото-серебряных, золоторудных, серебро-полиметаллических (со свинцом и цинком), медно-молибденовых, висмутовых (2, 3). Накопление К до 2–3 кларков происходит на фоне пониженного содержания (выноса) Th, что определяет калиевую радиогеохимическую специализацию (К-РГС). В то же время бескалиевые метасоматиты – зоны альбитизации, карбонатизации, хлоритизации, аргиллизации, окварцевания в ряде случаев сопровождаются относительным накоплением Th. Величину РГС мы определяем, как меру распада высокой положительной корреляции между К и Th, свойственной большинству безрудных магматических и осадочно-метаморфических пород при сравнении их с околорудными метасоматитами и гидротермалитами. РГС количественно представлена, как разность классов 1–10 измерений в табл. 1.

Приуроченность Th к месторождениям редких литофильных элементов была известна (1), но индикаторная роль К долгое время оставалась не изученной. Наши дальнейшие работы показали, что РГС калиевого и ториевого типов является устойчивой характеристикой многочисленных месторождений и рудных полей золоторудных, золото-серебряных, серебро-полиметаллических, медно-молибденовых,

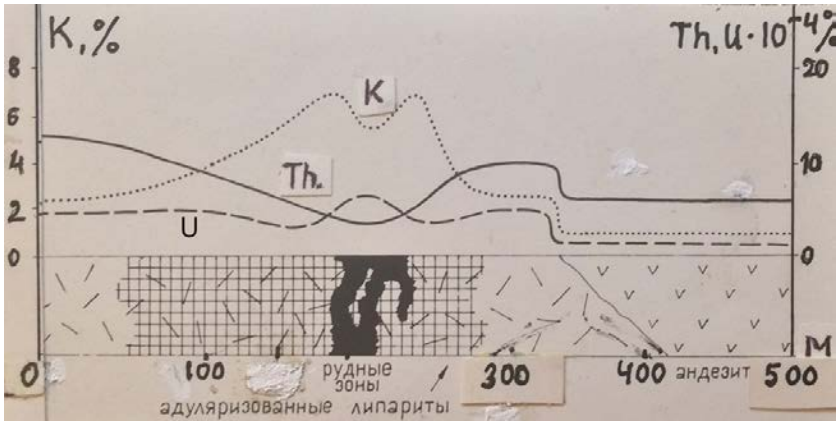


Рис. 3. Накопление К и вынос Th над адуляр-серицитизированными рудными зонами в риолито-дацитах месторождения Карамкен, Охотско-Чукотский вулканогенный пояс. АГСМ-данные

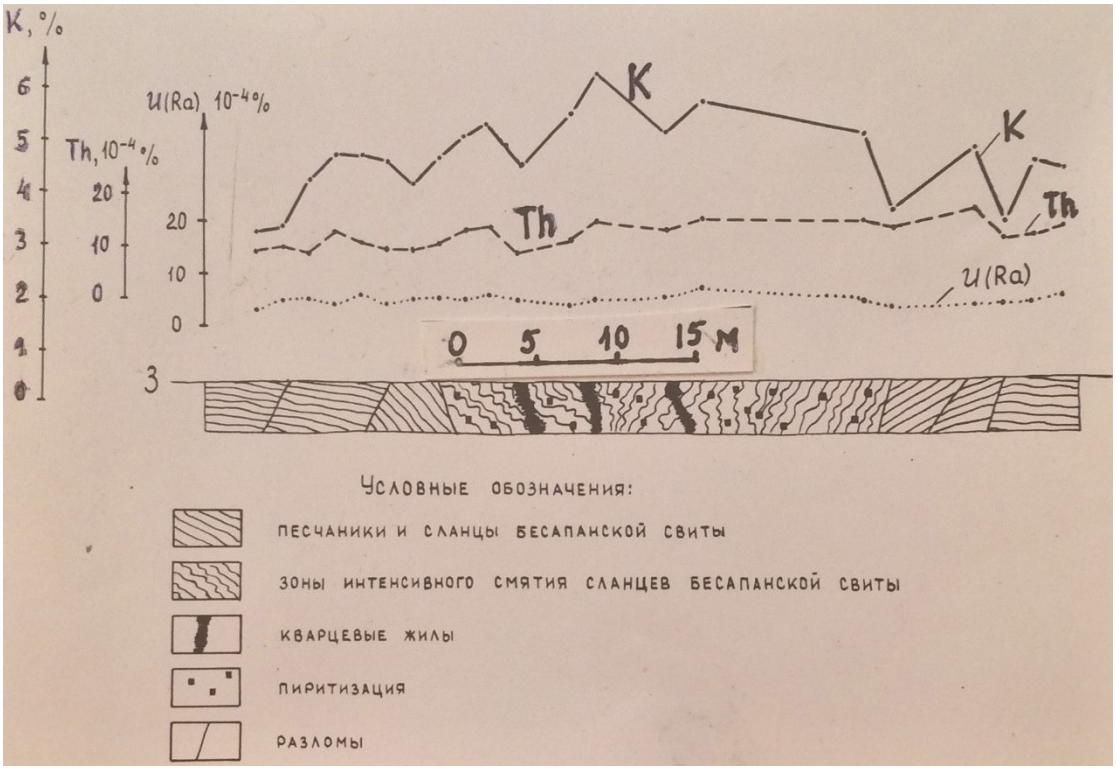


Рис. 4. Распределение К и Th в околорудных серицитовых метасоматитах месторождения Мурунтау, наземные анализы (Узбекистан)

висмутовых, свинцово-цинковых, а также редкометальных месторождений Охотско-Чукотского и Бельтау-Кураминского вулкано-плутонических поясов, Северного Урала, Казахстана, Закарпатья, Монголии и других регионов. К-РГС наблюдается также в редких типах глубинных пород – сыныритах, лейцититах, ультракалиевых риолитах.

Th-РГС характерна для таких глубинных рудоносных пород, как кимберлиты, карбонатиты, нефелиновые сиениты, а также для таких поверхностных типов месторождений, как бокситы, редкометальные россыпи, коры выветривания карбонатитов и пегматитовые поля (5), (рис. 2, 3, 4, 5, 6).

Причиной появления К-РГС в рудных полях халькофильных элементов является влияние CO_2 на кислотность рудоносного раствора. На глубинах более 2 км CO_2 определяет высокую кислотность гидротерм. Нами показано, что концентрация CO_2 в этих случаях достигает 250 г/кг раствора (4). CO_2 под высоким давлением образует угольную кислоту, которая растворяет щелочные элементы вмещающих пород и рудные металлы. На глубинах менее 1 км, в связи с падением давления, из гидротермальных растворов происходит взрывообразное выделение CO_2, формирующее пространство рудного поля – системы трещин, заполненные рудоносным раствором. При потере CO_2 растворы ощелачиваются и на щелочном геохимическом барьере происходят интенсивный калиевый метасоматоз и рудоотложение халькофильных элементов (5). Мощность адуляр-серицит-кварцевых метасоматитов составляет десятки метров, что позволяет надежно выделять их при АГСМ-съемке. Гамма-излучение изотопа К40 с энергией 1,46 МЭВ фиксируется кристаллическим датчиком NaI (Tl) на высотах до 250 м от излучающей поверхности.

Антагонистом калия в рудоносных гидротермальных системах является торий, поскольку этот элемент интенсивно вымывается из магматических пород при калиевом метасоматозе. В итоге накопление калия сопровождается выносом тория. Гамма--излучение Th с энергией 2,62 МЭВ типично для низкокалиевых околорудных метасоматитов кварц-топаз-турмалин-альбит-карбонат-хлорит-аргиллизитового состава с оруденением Sn, W, Be, TR, Nb, Ta и рудоносных низкокалиевых горных пород типа кимберлитов, карбонатитов, бокситов, а также россыпей и линейных кор выветривания. При автоматическом выделениии рудоперспективных зон в систему обработки АГСМ закладывается разность интервальных измерений скоррелированных значений К и Th (табл. 1). Например, адулярит, содержащий 6,5 % К (класс 9) и 15 • 10^{-4} % Th (класс 6), обладает, в соответствии с данными табл. 1, К-РГС = 3, отражая нарушение «стандарта безрудности», характерного для скоррелированных содержаний калия и тория в безрудных породах.

Монохроматическое гамма-излучение Cs^{137} оказалось также незаменимым для экспрессного поиска обширных районов заражения вследствие тех-

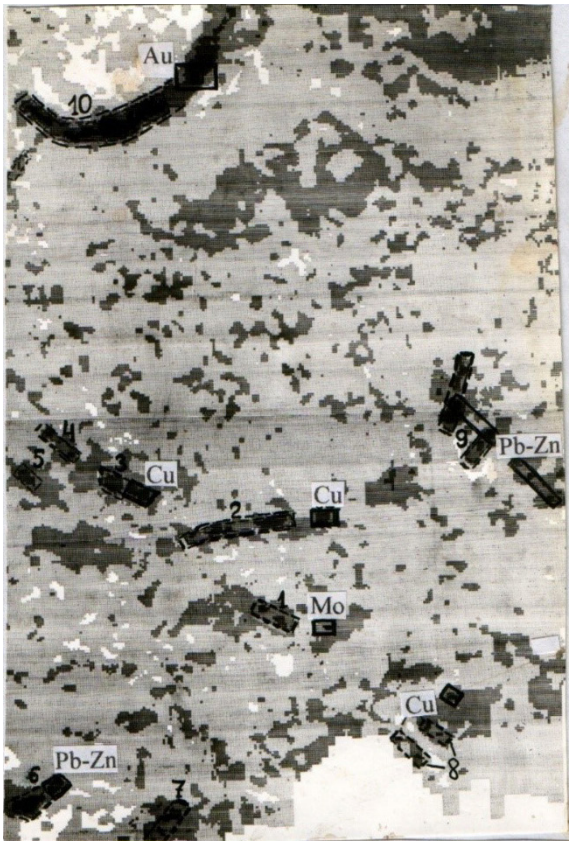


Рис. 5. Результаты обработки данных АГСМ-съемки с использованием принципа радиогеохимической специализхации по К

К-РГС > 2 (серое и черное) на рудныз зонах и рудоперспективных флангах месторождениий Au, Cu, Mo, Zn, Pb (Сев. Казахстан). Площадь АГСМ-съемки 250 км^2.

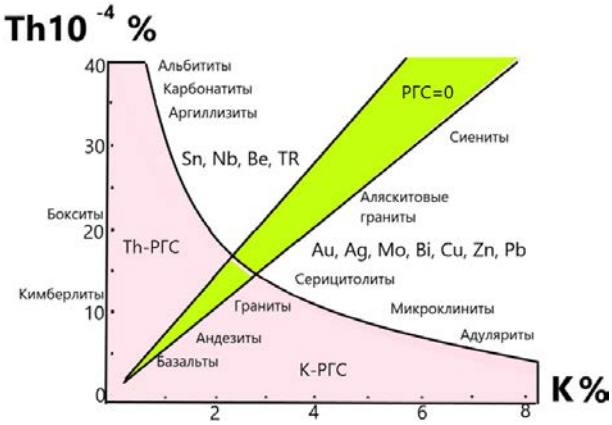


Рис. 6. Схема содержаний К и Th в горных породах. В магматических породах РГС = 0. Околорудные метасоматиты с К-РГС характеризуют халькофильную минерализацию с Au–Ag–Mo–Bi–Cu–Zn–Pb. Области с Th-РГС характеризуют литофильные редкие и редкоземельные руды Sn–Nb–Be–TR в альбититах и карбонатитах, а также алмазы в кимберлитах, Al в бокситах, Ti–Zr–TR в россыпях

ногенных катастроф на Чернобыльской АЭС (12, 13). Здесь в процессе наших работ было установлено, что высокая концентрация радиоизотопа цезия положительно коррелирует с такими опасными трудно диагностируемыми бета-альфа-излучателями, как стронций-90, плутоний, кюрий, америций (рис. 7).

Заключение

Аэрогеофизическая съемка показала свою высокую эффективность при изучении рудных месторождений в М : 1 : 10000–1 : 25000, но с 1991 года в России детальные работы долгое время не проводились по экономическим причинам (высокая стоимость съемочного времени для вертолетов и самолетов). В тот же период за рубежом появились портативные электронно-аналитические приборы, новые типы датчиков и, главное, новые дешевые носители-беспилотники (БПЛА) (8, 9, 10). Наиболее интересны такие приборы, как гамма-спектрометр GR-1 Kromek (Великобритания) массой 60 грамм, с потребляемой мощностью четверть ватта, основанный на CZT-детекторе (теллурид кадмия) объемом 1 $см^3$. Аэрогаммаспектрометры нового типа также созданы и используются в Японии, Белоруссии, Германии (11). АГМ-съемка позволяет эффективно направлять наземные геолого-разведочные работы.

Геофизическая съемка обычно проводится комплексно. Например, компания Mobile Geophysical Technologies (Германия) рекламирует комплексные услуги, выполняемые при помощи БПЛА по съемке магнитного, электромагнитного и гамма-спектрометрического полей, а также по радарной съемке и съемке в ИК-диапазоне (14, 15). Появление новой портативной и разнообразной геофизической техники позволяет вдохнуть новую жизнь в дешевый, эффективный, экспрессный, комплексный аэрогеофизический поиск рудных месторождений (16, 17, 18). Использование в алгоритме ЭВМ разработанных нами данных по индикаторным закономерностям поведения K и Th в земной коре и зонах рудоотложения может значительно повысить эффективность АГСМ-съемок. Новые проблемы современности, связанные с техногенными катастрофами АЭС и радиоактивными выбросами, также решаются быстро и на высоком уровне на базе беспилотников и новых детекторов гамма-излучения.

Литература

1. Смыслов А. А. Уран и торий в земной коре. – Л., Недра, 1974. – 231 с.
2. Островский Э. Я., Портнов А. М., Драбкин И. Е. Поиски близповерхностных месторождений золота в эффузивах методом аэрогаммаспектрометрии. // Геол. рудн. месторождений, 1970. – Т. XП. – № 3. – С. 87–92.
3. Портнов А. М., Островский Э. Я. Антагонизм калия и тория в зонах адуляризации золото-серебряных месторождений. – ДАН СССР, 1972. – Т. 204. – № 6. – С. 1463–1465.
4. Портнов А. М. Особенности распределения тория и калия в вертикальном разрезе золото-серебряных месторождений вулканических поясов. // Геол. рудных месторождений, 1985. – № 3. – С.113–115.
5. Портнов А. М. Радиохимическая специализация горных пород по калию и торию и ее связь с оруденением. // Изв. АН СССР, сер. геол., 1987. – № 3. – С. 101–121.
6. Портнов А. М., Власова Е. В., Хитаров Д. И. CO_2 как фактор рудопереноса и рудоотложения на близповерхностных золото-серебряных месторождениях. Геол. рудных. месторождений, 1987. – № 4. – С. 111–114.
7. Глинский Н. А., Кирсанов В. Н., Клепер Н. Б., Коротков В. В. и др. Съемки с использованием беспилотных летатаельных аппаратов – новый этап развития отечественной аэрогеофизики. // Российский геофизический журнал, 2014. – № 53–54. – С.122–126.
8. Паршин А. В. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов при выполнении геологоразведочных работ на рудных объектах Байкальской горной области. // Вопросы естествознания, 2015. – № 2 (6). – С. 97–101.
9. Семенова М. П., Цирель В. С. Перспективы развития беспилотной аэрогеофизики. //Разведка и охрана недр, 2016. – № 8. – С. 34–39.
10. Соколов С. В., Володько С. А., Юрченко Ю. Ю. Приходько Е. Ф. Методические основы инновационной технологии прогнозной оценки закрытых территорий по комплексу дистанционных и наземных геохимических методов. // Разведка и охрана недр, 2015. – № 6. – С. 30–37.
11. Коротков В. В., Овсянникова Т. М., Ржевская А. К. и др. Инновационные технологии прогнозирования, поисков и оценки месторождений твердых полезных ископаемых. «ВИМС». «Минеральное сырье». Серия методическая. № 17. – Москва, 2016. – 56 с.
12. Забулонов Ю. Л., Буртняк В. М., Золкин И. О. Аэрогаммаспектрометрическое обследование в Чернобыльской зоне отчуждения на базе БПЛА типа октоптер. // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ), 2015. – № 5 (99). – С. 163–167.
13. Портнов А. М. Гамма-излучатель Cs^{137} – экспрессный индикатор экологических катастроф. // Природа, 2019. – № 12. – С. 18–24.
14. Lahusen L., Stewart P., Kyser K. et all The Utility of Surface Geochemistry – The model. Uran Minerals Inc. Atabaska Basin, Saskatchevan, February, 2016.

15. Okuyama S., Torii T., Suzuki A. et al. Gournal of Nuclear Science and Technology, A Remote Radiation Monitoring System Using an Autonomous Unmanned Helicopter for Nuclear Emergencies. Supplement 5, P. 414–416 (Gune 2008).
16. www. aerogeo.ru.
17. www.geotech.ca.sn geotechairborne.com.
18. www.snlmetals.com World-Exploration-Trends-WET-Report-2016-English-SNL-Metals-mining.pdf.

УРАНОВЫЕ И РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ СИБИРИ В МАТЕРИАЛАХ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

А. А. Поцелуев[1,2], Ю. С. Ананьев[2], В. Г. Житков[2,3], А. А. Новгородцев[4], Е. А. Митрофанов[5]

[1]ООО «КосмоГеопро»
Томск, Россия, poceluevaa@mail.ru
[2]Томский политехнический университет
Томск, Россия, ananyevys@mail.ru
[3]Томский государственный университет
Томск, Россия, vlgitkov@yandex.ru
[4]АО «Русбурмаш»
Москва, Россия, AANovgorodtsev@rbm-armz.ru
[5]АО «УРАНГЕО»
Иркутск, Россия, mitevgen@mail.ru

URANIUM AND RARE METAL DEPOSITS OF SIBERIA IN THE SPACE IMAGERY DATA

A. A. Potseluev[1,2], Y. S. Ananyev[2], V. G. Zhitkov[2,3], A. A. Novgorodtsev[4], E. A. Mitrofanov[5]

[1]ООО «КосмоGeopro»
Tomsk, Russia, poceluevaa@mail.ru
[2]TomskPolytechnicUniversity
Tomsk, Russia, ananyevys@mail.ru
[3]TomskStateUniversity
Tomsk, Russia, vlgitkov@yandex.ru
[4]«RUSBURMASH»
Moscow, Russia, AANovgorodtsev@rbm-armz.ru
[5]«URANGEO»
Irkutsk, Russia, mitevgen@mail.ru

Based on the information recovered from modern satellite surveys of low, medium and high spatial resolution, the features of the geological settings of areas of distribution and individual uranium, and rare metal deposits in Siberia are studied. Ore-bearing formations of various levels (district, node, field, deposit), the features of their geological settings including deep structures are sometimes clearly recognizable in remote sensing data. General criteria for the control of ore formations are noted: – circular structures of different diameters; – zones of radial lineaments and areas of their articulation with circular structures; – a combination of circular and radial elements that together form structures of a focal nature. The complex analysis of these structural elements makes it possible to reconstruct the development of geological processes, including ore-forming ones.

Введение

Последнее десятилетие в практике геологоразведочных работ стали широко применяться материалы мультиспектральных космических съемок [3]. Их использование весьма актуально как на малоизученных площадях, так и в пределах известных горнорудных районов. Материалы космических съемок позволяют получать и уточнять как традиционную информацию, так и выявлять новые данные о геологическом строении и особенностях минерагении изучаемых площадей. В первом случае это картирование различных по составу геологических тел, элементов тектоники и др. К новым данным относятся, главным образом, структуры различной морфологии, выявление которых традиционными методами затруднено в силу методических особенностей их проведения (профильность и дискретность наблюдений), либо они проявляются только в данных мультиспектральных наблюдений, включающих «невидимые» области спектра.

Различные в иерархическом плане (от провинции до месторождения) рудоносные образования

проявляются в материалах космосъемок определенными характерными структурами кольцевой, линейной и блоковой морфологии [5].

Во многих работах отечественных и зарубежных специалистов показано, что формирование масштабных урановых месторождений связано с крупными структурами земной коры изометричной формы – гранито-гнейсовыми куполами, вулкано-тектоническими депрессиями, кальдерами и др. При этом подчеркивается, что месторождения урана областей континентального вулканизма обнаруживают закономерную приуроченность к интрагеоантиклиналям разновозрастных складчатых систем. В этом отношении не являются исключением и урановые месторождения других типов, например, «несогласия» и месторождения зон пластового окисления.

В данной статье обсуждаются результаты проведенных разномасштабных исследований в ряде рудных районов урановых и редкометалльных месторождений Сибири.

Материалы и методы

В основу исследований положены материалы мультиспектральных космических съемок низкого-среднего (Modis, Landsat ETM+, Landsat 8, Aster) и высокого пространственного разрешения (Ikonos, WorldView-1, WorldView-2,GeoEye-1, QuickBird). Как правило использовались материалы архивных съемок, но в ряде случаев съемки выполнялись оперативно по заказу. С целью создания цифровых моделей рельефа использованы материалы радарных съемок – SRTM и AsterGDEM.

Общая методика исследований космоматериалов включала в себя последовательно следующие этапы – подготовка, обработка, анализ и дешифрирование. При этом решались следующие задачи: – подбор исходных космических данных различных систем; – улучшение, классификация растровых изображений и их дешифрирование; – создание спектрозонального изображения из моноканальных растров и его обработка; – расчет спектральных индексов; – корреляционный анализ многоканальных изображений методом главных компонент; – спектральный анализ многозонального изображения материалов Aster; – дешифрирование всего комплекса синтезированных изображений с выделением линейных и кольцевых (дуговых) структур, а так же элементов геологического строения; – интерпретация полученных материалов и составление схем дешифрирования.

Результаты и их обсуждение

Центрально-Алданский (Эльконский) золото-урановый рудный район расположен в северо-восточной части Алданского горнопромышленного района республики Саха (Якутия). Район находится на периферии гигантского купола раннедокембрийских пород и пространственно ассоциирует с ареалом субвулканических интрузий щелочноземельных-щелочных пород.

Выполненный ранее [2] анализ космоснимков, морфоструктур, глубины залегания кристаллического фундамента, распределения радиальных и кольцевых разломов позволил выделить здесь радиально-кольцевую структуру диаметром около 120 км, названную Центрально-Алданским магматектоногеном. Он состоит из ядра, радиальных блоков и вмещает основную часть мезозойских щелочных пород, золотые, урановые и золото-урановые месторождения. Магматектоноген выделяется в гравитационном поле, ему также соответствует высокоомная воронка, уходящая корнями в верхнюю мантию.

Нами выполнена обработка и дешифрирование материалов мультиспектральных космических съемок Landsat, QuickBird, Alos и анализ цифровой модели рельефа.В результате проведенных работ получены структурные схемы Эльконскогоурановорудногорайона и месторождений Зоны Южная, являющейся наиболее крупной урановосной структурой района (рис. 1).

Основными структурными элементами Эльконского рудного района являются (рис. 1 А):

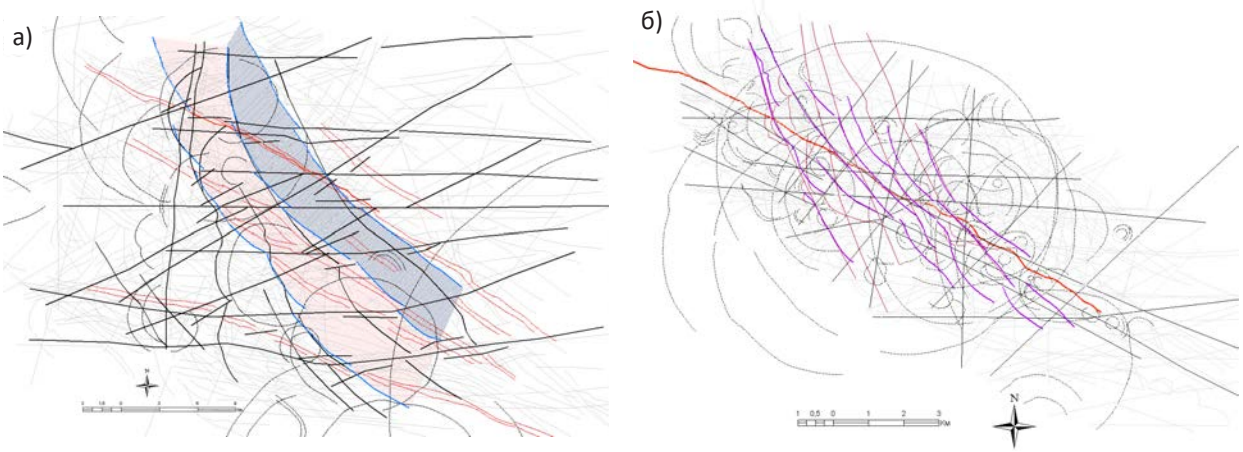


Рис. 1. Структурные схемы Эльконского урановорудного района (А) и Зоны Южная (Б)

• структуры северо-западного простирания. К структурным элементам данной ассоциации относятся и потенциально рудоносные зоны. В целом Эльконский рудный район залегает в пределах зоны линеаризации северо-западного простирания, ширина выхода которой превышает 24 км. В пределах данной зоны статистически возможно выделить несколько локальных линейныхструй мощностью 2,5–3,5 км;

• линеаменты субширотного простирания, образующие пучки и зоны мощностью около 1,5 км. В ряде случаев, наблюдается срезание северо-западных зон субширотными нарушениями;

• структуры север-северо-западного направления в основном проявлены в центральной и западной частях исследуемой территории. Они являются более молодыми по отношению к линеаментам северо-западного направления. Эти нарушения образуют зону, названную нами Секущей. Зона Секущая имеет ширину выхода на дневную поверхность около 6 км и дугообразную форму в плане, что свидетельствует о ее наклонном залегании с падением к северо-востоку. В пределах зоны выделяются два блока: лежачий (на структурной схеме отмечен красной штриховкой) и висячий (обозначен серой штриховкой). Лежачий блок характеризуется развитием цепочки кольцевых структур, которые являются отражением глубинных очагов, с которыми, по-видимому, связано формирование интрузивных и субвулканических тел. Висячий блок захватывается только периферическими частями кольцевых структур. «Рудные столбы», которые отмечаются аномалиями, главным образом, урана и золота на продольных проекциях зоны Южной, развиты только в пределах висячего блока Секущей зоны. Учитывая острый угол между простиранием зоны Южной и зоны Секущей, и их встречное падение, можно сделать вывод о полого погружающейся к юго-востоку их линии скрещения, то есть, в том же направлении, что и склонение «рудных столбов»;

• кольцевые структуры имеют различные размеры. Их диаметры лежат в пределах от 35–45 до 2,5 км. Наибольшее распространение имеют кольцевые элементы с диаметрами 8,5–11 км. На площади работ кольцевые структуры формируют пояс, имеющий северо-западное – субмеридиональное простирание.

Основные структурные элементы Эльконского рудного района детализированы при изучении Зоны Южная (рис. 1 Б).

Хиагдинскоеурановорудное поле располагается в пределах Амалатского плато на сопряжении Сибирской платформы и Урало-Монгольского подвижного пояса. Наиболее крупной тектонической структурой является Байсыханское поднятие кристаллического фундамента, прослеживающееся через всё плато с юго-запада на северо-восток. Размещение рудных залежей контролируется погребенными под платобазальтовым покровом палеодолинами (выполнены палеогеновыми осадками), развивающимися на юго-восточном и северо-западном склонах поднятия. В пределах Хиагдинского рудного поля известны 8 месторождений, из которых изучены Дыбрынское, Хиагдинское, Кореткондинское, Намаруское [1]. Всеони относятся к гидрогенному палеодолинному типу.

В пределах месторождения **Дыбрынское** развиты два структурных парагенезиса разрывных нарушений – ранний и поздний. К структурам раннего парагенезиса отнесены разрывные нарушения субмеридионального (север-северо-восточного) простирания и ортогональные структуры субширотного простирания. По субмеридиональным структурам предполагаются левосдвиговые смещения. Разрывные нарушения позднего парагенезиса представлены северо-восточными и северо-западнымиструкту-

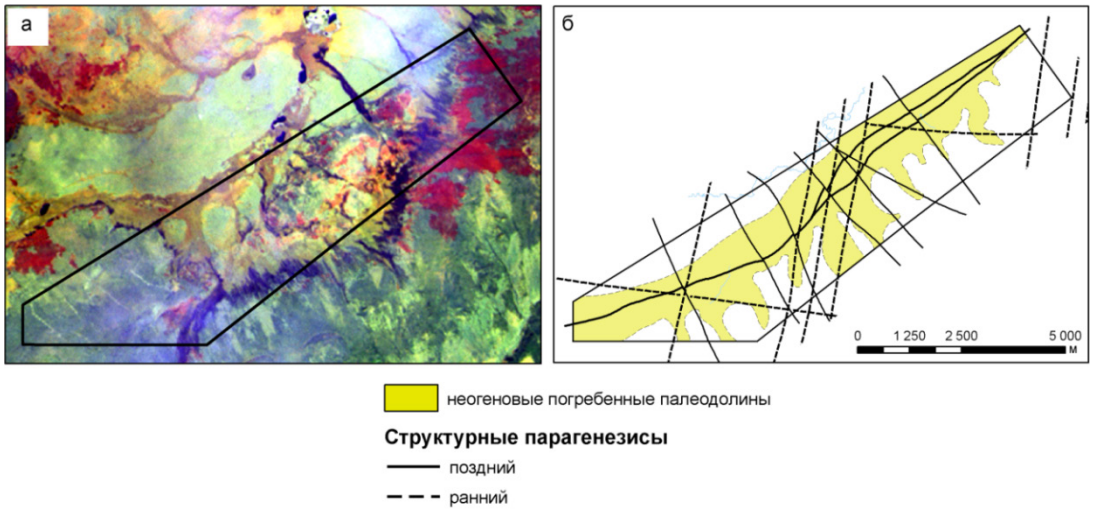


Рис. 2. Месторождение Дыбрынское

а – комбинация информативных спектральных каналов; б – структурная схема

рами. Главной тектонической структурой позднего парагенезиса является Коретконди́нский разлом. В северо-восточной части площадион уверенно дешифрируется двумя швами. В центральной части он осложняется ортогональными структурами второго порядка северо-западного простирания. В центральной и юго-западной части месторождения закартированы 6 кольцевых структур, которые интерпретируются как элементы погребенной вулканической постройки и как жерла вулканических аппаратов центрального типа.

На **Хиагдинском** и **Коретконди́нском** месторождениях так же установлены разрывные нарушения двух структурных парагенезисов – раннего и позднего (рис. 3). Главными разрывными нарушениями месторожденийсоответственно являются Хиагдинский и Коретконди́нский разломы северо-восточного направления. По этим разломам определяются вертикальные перемещения северо-западных блоков относительно юго-восточных с амплитудой 25 и 15 м соответственно. По более поздним разломам северо-западной ориентировки отмечаются малоамплитудные право- и лево-сдвиговые смещения.

Выполненные исследования показывают, что структуры месторождений Хиагдинского рудного поля контрастно проявлены в материалах космиче-

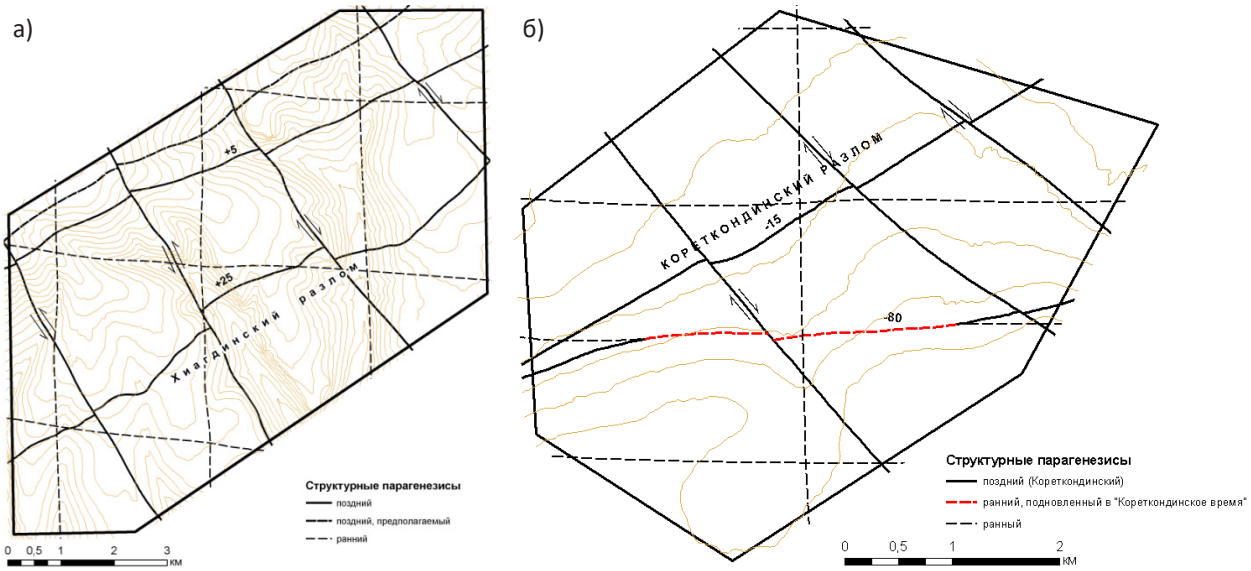


Рис. 3. Структурные схемы Хиагдинского (а) и Коретконди́нского (б) месторождений

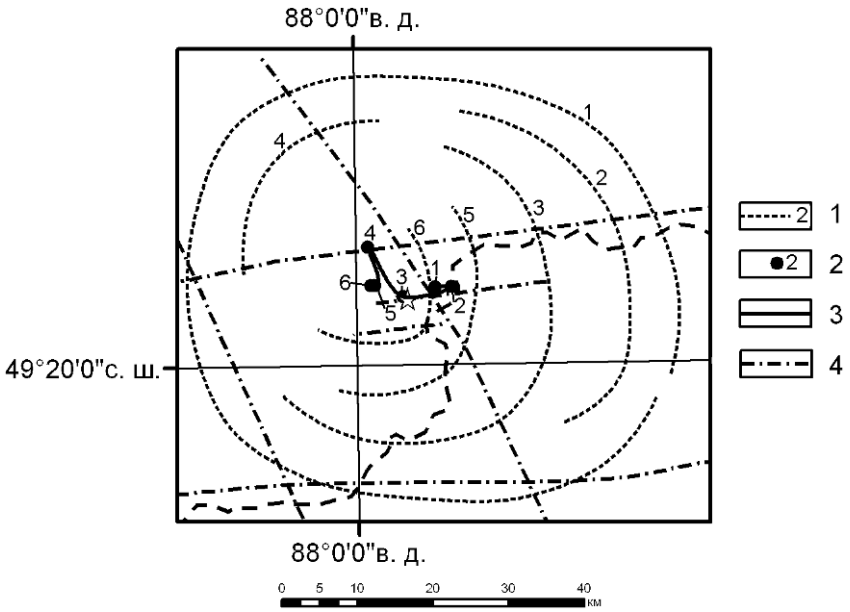


Рис. 4. Космоструктурная модель района Калгутинского месторождения

1) основные кольцевые структуры и их номера, 2) центроиды кольцевых структур и их номера, 3) проекция на дневную поверхность траектории изменения положения очага Калгутинской рудно-магматической системы, 4) главные линеаменты района

ских съемок различного спектрального и пространственного разрешения. Положение погребенных палеодолин, при их небольшой глубине залегания, достаточно уверенно фиксируются в материалах дистанционных съемок. Дешифрируемые в пределах месторождений кольцевые структуры интерпретируются как элементы погребенных вулканических построек и как жерла вулканических аппаратов центрального типа.

Эти структурные построения подтверждены результатами буровых работ.

Район Калгутинского редкометалльного грейзенового месторождения характеризуется широким развитием крупных структур линейной и кольцевой формы, являющихся элементами единой структурной модели [4].

В районе выявлено более 40 линеаментов разной протяженности и направления, интерпретируемые как разрывные нарушения, создающие в центральной части структуру «битой тарелки». Наряду с этим, выделяются крупные линейные зоны, различной ориентировки, пересекающие весь район и выходящие за пределы изученной площади. Само Калгутинское месторождение находится в узле их сопряжения (рис. 4).

В районе месторождения выделяется 20 кольцевых структур и их дуговых фрагментов. По размерам, особенностям пространственного положения, взаимоотношению все КС разделяются на две группы.

Район Калгутинского месторождения локализован внутри крупной изометричной кольцевой структуры (диаметр около 50 км), характеризующейся телескопированным эксцентричным характером расположения колец основной структуры с проявленными автономными локальными структурами (вторая группа), сосредоточенными в юго-восточной части района. Калгутинское месторождение находится во внутренней части основной кольцевой структуры.

Положения центроидов колец основной кольцевой структуры позволяет восстановить характер и траекторию перемещения очага рудно-магматической системы, формирующего данные структуры. При подъеме очага к поверхности он смещался с востока – юго-востока на запад – северо-запад. Иначе говоря, структура, контролирующая развитие Калгутинской рудно-магматической системы погружается с запад – северо-запада на восток – юго-восток. Такой вывод подтверждается результатами геолого-геофизического моделирования, показывающими наличие в центральной части интрузивного массива глубокозалегающей «ножки», погружающейся на юго-восток под углом 45–60°.

Заключение

Рудоносные образования различного иерархического уровня (провинция, район, узел, поле, месторождение, рудоносная зона), особенности их геологического и в том числе глубинного строения отчетливо проявляются в материалах космических съемок.

Отмечаются общие космоструктурные критерии контроля рудных образований: – кольцевые структуры различного диаметра, в том числе имеющие сложное телескопированное строение; – радиальные зоны линеаментов и участки их сочленения с кольцевыми структурами; – сочетание кольцевых и радиальных элементов, образующих в совокупности структуры очагового характера. Их комплексный анализ позволяет проводить реконструкцию развития геологических и в том числе рудообразующих процессов;

Ряд геологических структур выявляются главным образом, либо только по данным космосъемок. К ним относятся в первую очередь кольцевые структуры, связанные с эндогенными «взрывными» процессами, различной природы. Они характеризуются высокой рудоносностью и с ними, как правило, связаны комплексные с благородными металлами гидротермальные урановые и редкометалльные месторождения.

Выполненные исследования показывают, что анализ материалов космических съемок целесообразно применять на всех этапах и стадиях геологоразведочных работ, не только в начале, но и в процессе их проведения. Это позволяет оптимизировать систему ГРР, сократить сроки и затраты на их проведение.

Исследования выполнены при поддержке грантов УР.09.01.415, РФФИ 05-05-64356, РФФИ 10-05-00115.

Литература

1. Ананьев Ю. С. Структуры месторождений Хиагдинского урановорудного поля в материалах мультиспектральных космических съемок / Ю. С. Ананьев, А. А. Поцелуев, А. А. Новгородцев, В. Г. Мартыненко, В. Г. Житков // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы IV Международной конференции. – Томск, 2013. – С. 48–52.
2. Казанский В. И. Геологическая позиция и история формирования Эльконского урановорудного района (Алданский щит, Россия) / В. И. Казанский, Е. П. Максимов // Геология рудных месторождений, 2000. – Т. 42. – № 3. – С. 212–230.
3. Поцелуев А. А. Дистанционные методы геологических исследований, прогнозирования и поисковместорождений полезных ископаемых:

учебное пособие для вузов / А. А. Поцелуев, Ю. С. Ананьев, В. Г. Житков. – 3-е изд. – Томск: Изд-во STT, 2019. – 192 с.
4. Поцелуев А. А. Космоструктурная модель Калгутинского редкометалльного месторождения (Горный Алтай) / А. А. Поцелуев, Ю. С. Ананьев, И. Ю. Анникова и др. // Известия ТПУ, 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 45–53.
5. Поцелуев А. А. Материалы современных космических съемок при изучении рудоносных районов Сибири / А. А. Поцелуев, Ю. С. Ананьев, В. Г. Житков // Руды и металлы, 2011. – № 3–4. – С. 138–139.

НАКОПЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (U, Th) В МНОГОСЛОЙНОЙ ЗАЛЕЖИ ОЛИГОТРОФНОГО БОЛОТА (ЮЖНАЯ ТАЙГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

Ю. И. Прейс[1], Л. П. Рихванов[2], А. Е. Мальцев[3]

[1]Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
Томск, Россия, preisyui@rambler.ru
[2]Томский политехнический университет
Томск, Россия
[3]Институт геологии и минералогии СО РАН
Новосибирск, Россия, maltsev@igm.nsc.ru

ACCUMULATION OF RADIOACTIVE ELEMENTS (U, Th) IN THE MULTILAER PEAT DEPOSIT OF THE RAISED BOG (SOUTHERN TAIGA OF WESTERN SIBERIA)

Yu. I. Preis[1], L. P. Rikhvanov[2], A. E. Maltsev[3]

[1]Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS
Tomsk, Russia, preisyui@rambler.ru
[2]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia
[3]V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
Novosibirsk, Russia, maltsev@igm.nsc.ru

In this paper, we consider the temporal dynamics features of the radioactive elements (Th, U) content in the core of a high-moor multilayer swamp peat deposit, typical for the forest zone of Western Siberia. The role of global, regional, and local factors in the accumulation of Th and U at different stages of bog formation has been determined. Significant direct and indirect (through the consequences of cryogenic processes) influence of the Holocene climate on the accumulation of these radioactive elements have been established. Significant losses of U in peat deposits of runoff flowing troughs were revealed. The Uconcentrations and EF (U) have been proposed as an indicator of the degree of the flow of bog paleoecotopes water regime.

Введение

Олиготрофные болота активно используются для современного и палеомониторинга геохимических и климатических обстановок окружающей среды. В Западной Сибири торфяные болота являются одним из основных ландшафтов, поэтому необходимы знания о региональных источниках и особенностях временной динамики поступлениях накопления радиоактивных элементов в их торфяные отложения. Торфяные залежи, особенно олиготрофных глубоко залежных болот, являются хранилищами ценной информации об геохимических, экологических и климатических условиях в голоцене. Поэтому они являются одним из основных объектов, используемых для реконструкций и прогнозов этих условий. Для обоснованных прогнозов для Западной Сибири необходимы знания о региональных особенностях болотообразовательного процесса и отклика болот на климатическиеизменения голоцена. Однако этот вопрос еще недостаточно разработан в связи с многообразием типов болот, путей их аутогенного и климатогенного развития, а также недостаточной изученностью значимости индикаторов изменений, как климата, так и функционального состояния болот для Западно-Сибирского региона.

Имеются данные о накоплении U и Th в разных типах и видах торфяных залежей Западной Сибири [1, 2, 4, 7, 12], но отсутствуют для широко распространенных верховых топяных залежей.

Целью данного исследования является выявление особенностей накопления U и Th в топяных торфяных залежах олиготрофных болот юга лесной зоны Западной Сибири в зависимости от источников поступления этих элементов и изменения гидротермических режимов болотных палеоэкотопови климата голоцена.

Материалы и методы

Объекта исследования является глубокозалежный (7,85 м) торфяной разрез (ТР) Болтное, заложенный на юге Томской области, на севере центральной части Большого Васюганского болота (57°04'44,3'' с. ш.; 79°34'29,2'' в. д.). ТР заложен в регрессивном сосново-кустарничково-лишайниково-сфагновом сообществе у вершины ложбины стока в зоне контакта выпуклых верховиков, образованных фускум-залежами. ТР образован верховой многослойной топяной залежью (765 см), органо-минеральными отложениями (ОМО) (10 см) и гумусированным суглинком (10 см). Согласно AMS-датированию возраст ТР на глубине 735 см равен 8194 кал. лет назад (л. н.), ОМО — около 12000 кал. л. н. (принят согласно данным спорово-пыльцевого анализа [3]).

На данном ТР ранее были выполнены комплексные исследования общетехнических, химических, изотопных ($d^{13}C$) свойств торфа и спорово-пыльцевых спектров, получено и откалибровано 11 AMS-дат. По комплексу индикаторов выполнена реконструкция динамики гидротермических режимов болота [9] и палеоклимата [3]. Для достижения цели данной работы определены послойные (через 1,5–5 см) показатели концентрации урана и тория нейтронно-активационным методом в сухом веществе торфа в Ядерно-геохимической лаборатории Кафедры геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета. Для определения корреляция поступления урана и тория с пылью рассчитаны коэффициенты их обогащения (EF) относительно содержания скандия в осадочных породах [6] по формуле, предложеннойв [11]. Проведено сравнение данных полученных по ТРБолтное и других разрезов из литературных источников. Использованы данные реконструкции климата голоцена лесной зоны [10] и лесостепи [13] Западной Сибири.

Результаты и их обсуждение

Содержание урана в воздушно-сухой массе торфа, ОМО и подстилающего суглинка изученного разреза значительно колеблется (табл. 1). Среднее содержание U (Ucp.) в торфяной залежи равно 0,14 мг/кг (табл. 1), и сходно с Ucp. глубокозалежного верхового ТР Малая Ича (0,15 мг/кг) [7], также расположенного в центре Большого Васюганского болота, но представленного фускум-залежью. При этом, Ucp. в слое верхового торфа ТРБолтное ниже в 85 раз, чем в слое низинного торфа и в 425 раз, чем в слое ОМО (табл. 1), а также ниже в 8,5–15,5 раз, чем для верховых торфов юга Западной Сибири [1, 2, 4, 12], в том числе ТР Малая Ича (0,14 мг/кг) [7]. В слое низинного торфа ТР Болтное Ucp. сходно со Ucp. в низинных торфах (2,23 мг/кг) южнотаежной подзоны Западной Сибири [4].

Содержание торияв ТР Болтное также значительно варьирует (табл. 1). Для всей торфяной залежисреднее содержание Th (Thcp.) равно 0,17 мг/кг, что немного ниже, чем для ТР Малая Ича (0,22 мг/кг).Для слоя верхового торфа Thcp ниже в 6,4 раза, чем для слоя низинного торфа и в 53–66 раза чем для слоев ОМО и суглинкаэтого разреза, а также ниже,чем для слоев верхового торфа ТР Малая Ича (в 1,7 раза) [7] и юга Западной Сибири (в 2,3–3,5 раза) [1, 2, 4].Для низинных торфов ТР Болтное Thcp (0,83мг/кг) сходно с данным показателем (0,87 мг/кг) для низинных торфовюго-восточной части Западно-Сибирской плиты в связи со сходством ихсредней зольности (13,4 %) [2].

Показатель Th/U в ТР Болтное значительно варьирует по глубине при среднем значении для разреза 83,4, что в десятки раз выше средних значений Th/U (1,45–2,2) для верховых торфов юга Западной Сибири [1, 2, 4, 7]. Это обусловленосодержанием U ниже предела обнаружения анализа в основной толще верхового торфа. Слои торфа с ториевой природой (Th/U > 3) абсолютно господствуют от поверхности до 625 см, ниже, до 745 см, характерно чередование та-

Таблица 1. Содержание урана и тория в торфяных разрезах Болтное и Малая Ича

Слои разреза	Толщина слоя, см	Зольность, %		U, мг/кг		Th, мг/кг	
		мин.–макс.	ср.	мин.–макс.	ср.	мин.–макс.	ср.
Торфяной разрез Болтное							
верховой торф	720	1,0–7,1	2,2	0,001–0,37	0,02	0,01–0,75	0,14
низинный торф	45	6,1–36,3	14,4	0,001–8,07	2,01	0,01–3,40	0,83
вся торфяная залежь	765	1,0–36,3	3,0	0,001–8,07	0,14	0,01–3,4	0,17
ОМО	10	51,1–70,0	60,5	9,17–10,79	9,98	5,09–8,65	6,87
суглинок	10	92,8–97,0	94,5	0,50–4,05	2,27	8,31–8,77	8,54

ких слоев со слоями смешанной (1 < Th/U < 2,5–3) и урановой (Th/U < 1) природы, а до 780 см – господство торфов урановой природы.

Распределение урана и тория по глубине разреза имеет существенные различия (рис. 1).

Ураном значительно обогащены только нижняя часть разреза: слои суглинка, ОМО, низинного и частично верхового торфа (625–785 см) и поверхностный слой (0–39 см).Обогащение торием характерно для всего разреза. Корреляция U и Th в нижней части разреза отсутствует (r = –0,48), что отражает преобладание разных источников их поступления. Известно, что на ранней стадии образования болот основным источником поступления для U являются грунтовые воды, а для Th – терригенный материал, поступающий с окружающих более высоких элементов рельефа.

На ТР Болтное выявлена достаточно мощная (745–775 см), кайма обогащения многими микроэлементами на границе минерального грунта и болотных отложений. Торфяные отложения выполняют здесь роль окислительно-восстановительного барьера на пути миграции почвенно-грунтовых вод. В слоях ОМО и низинного торфа преобладают остатки растений высоко обводненных болотных палеоэкотопов. Следовательно, значительное обогащение ураном этих слоев обусловлено восстановительными условиями в связи с обильным поступлением грунтовых вод, а, судя по высоким показателям концентрации Th в слое 745–775 см, вероятнее всего, и терригенным сносом с прилегающих более высоких элементов рельефа. Максимальное содержание U (2,5–10,8 мг/кг) характерно для ОМО и вышезалегающего слоя низинного торфа (745–775 см) с зольностью 12,5–70,0 %.

Неправомерно высокая вариабельность послойных концентраций U вслоях низинного торфа (до 725 см), а Th и в нижнем слое верхового торфа (ниже 605 см) (рис. 1) индицирует неоднократные резкие изменения водного и, вполне вероятно, термического режима палеоэкотопов и климата. Согласно [3], накопление нижних слоев этого разреза имело пульсирующий характер. В сухие похолодания неоднократно происходило обсыхание поверхности болота и формировалась многолетняя мерзлота (ММ), накопление ОМО и торфа прекращалось. В последующие потепления деградация ММ вызывала подъем уровня грунтовых вод и переувлажнение поверхностных слоев разреза. Это активизировало поступление U и его осаждение.

В вышезалегающем слое 625–745 см произошло резкое понижение содержания U и Th (Ucp. – 0,14 мг/кг, Thcp. – 0,16 мг/кг). При уменьшении влияния подстилающего грунта и ОМО, а также грунтовых вод в связи с накоплением торфа, увеличилась роль климатических условий и гидротермических режимов болотных палеоэкотопов в накоплении U и Th. Максимальное влияние на уменьшение содержания U и Th оказали аридизация климата около 10000 кал. л. н. (740 см), вызвавшая разболачивание и прекращение аккумуляции торфаи глобальное сухое похолодание 8200 кал. л. н. (730 см). Однако уже 8050 кал. л. н. (725 см) в условиях сухого потепления содержание U и Th резко возросло. В это время обвод-

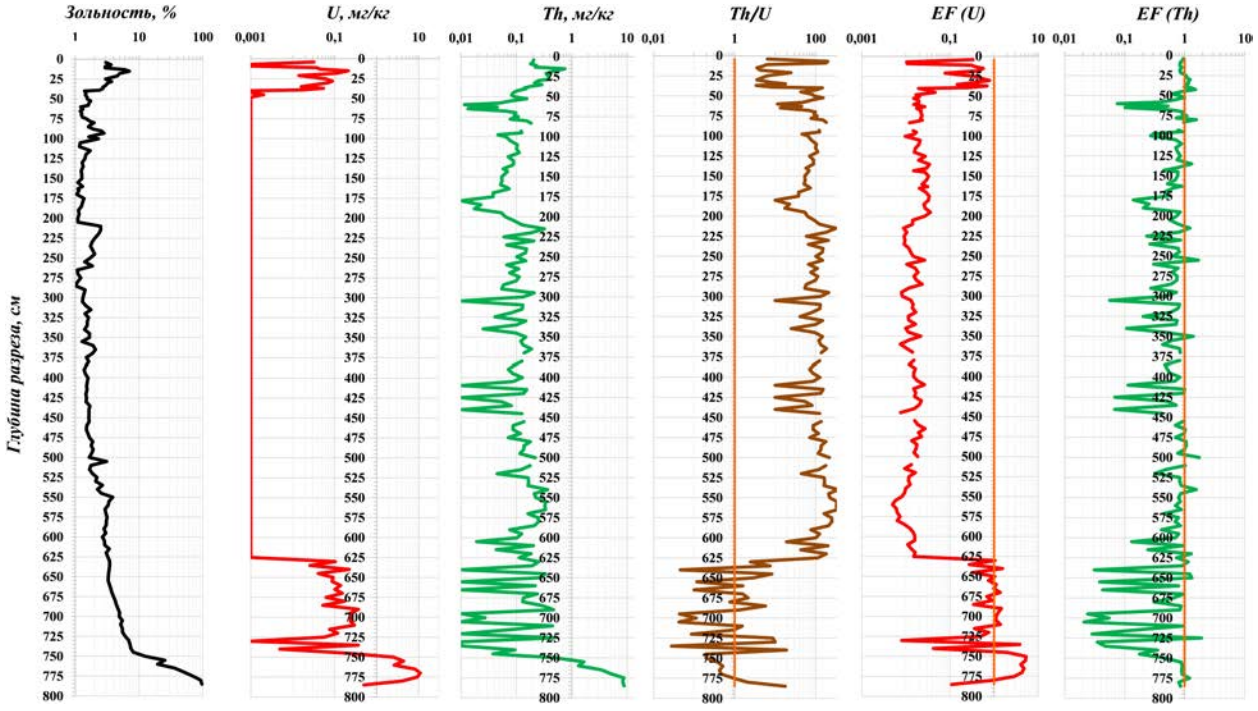


Рис. 1. Распределение зольности, тория, урана, отношения Th/U, коэффициентов обогащения (EF) U, Th с нормированием по скандию по глубине разреза Болтное

ненность болотного экотопа повысилась, вероятнее всего за счет поступления талых вод деградирующей ММ с вышерасположенных соседних участков болота, сформировавшейся в предшествующий период глобального похолодания. Это предположение основано на полученных нами данных о широком распространении криогенных процессов на болотах южной тайги Западной Сибири в периоды похолоданий голоцена [8], что является региональной особенностью. Около 7974 кал. л. н. данный участок болота перешел на олиготрофную стадию развития. Содержание U оставалось относительно высоким до 6270 кал. л. н. (620 см) в преимущественно теплых и влажных условиях атлантического оптимума голоцена. Однако содержание Th в этих условиях продолжало значительно варьировать, достигая значений ниже предела обнаружения анализа (< 0,02 мг/кг), несмотря на относительно высокую зольность торфов – 3,5–8,1 %, в основном в кратковременные (около 100 лет) сухие похолодания. Вероятно это было обусловлено уменьшением потока аэрозолей с аридных территорий, на которых влажность климата в это время возрастала [13], а также наиболее низкой за весь период голоцена запыленностью атмосферы, судя по минимальному содержанию Th и в торфах верхового болота Швейцарии в этот период [10].

В слое 39–625 см (145–6314 кал. л. н.) содержание U ниже предела разрешения данным методом (< 0,002 мг/кг). Скорость редукции U значительно повышается при наличии в системе гуминовых веществ [5]. Низкое содержание гуминовых веществ в слаборазложившихся верховых торфахэтого слоя не способствует осаждению U и в окислительных условиях он должен легко переходить в подвижную форму. На месте данного разреза практически всегда (за исключением последних нескольких сотен лет) существовала проточная топь, в которой воды поверхностного слоя торфа даже высокообводненных палеоэкотопов были обогащены кислородом. Влажность климата в этот период вцелом была ниже, чем в предшествующий период. Высокая обводненность болотных экотоповданной ложбины стока была обусловлена, не только ежегодными поступлениями поверхностно-сточных вод в периоды снеготаяния и дождей с более высоких соседних участков болота, но и водами деградирующей ММ. Неоднократноеформирование ММ в периоды похолоданий голоцена на соседних участках и поступление ее вод косвенно подтверждено наличием в торфах этой ложбины стока атрариковой кислоты лишайников, типичных для ММ местообитаний. Все это, по нашему мнению,и обусловило активный вынос U. Вполне вероятно, что ежегодными мощными потоками воды происходил вынос не только подвижных органо-минеральных соединений, но и поступающих из атмосферы частиц пыли содержащих U и Th. Об этом косвенно свидетельствуют более низкие концентрации Th (табл. 1) в верховых торфах этого ТР, чем ТР Малая Ича. Минимальное содержание Th в этом слое соответствует периодам сухихпохолоданий около 6200–6100, 4200–3975, 3360, 3040, 1480–1280, 520 и 315 кал. л. н., когда уменьшался привнос аэрозолей с южных аридных территорий, в которых в это время повышалась влажность климата и почв [13].

Показатели EF (Th) и EF (U) близкие к 1 подтверждают поступление этих элементов с пылью. В ТР Болтное эти показатели значительно варьируют и распределяются крайне неравномерно, сходно с Th и U (рис. 1). В ТР Малая Ича, формировавшемся в условиях отсутствия активного стока,в большинстве проб EF (U) превышает 1, что подтверждает зависимость накопления U от органической части торфа, а EF (Th) близко к 1, коррелирует с поступлением пыли [7], а в основной толще ТР Болтное эти показатели значительно ниже 1. Показатели EF (U) меньше 1 составляют 85 %, из них значения 0,005–0,04 – 76 %, что с большой вероятностью подтверждает потери U в результате его выноса водами ложбины стока. Для EF (Th) показатели близкие к 1 (0,6–1,5) составляют 66 %, меньше 1 (0,01–0,5) – 28 %. То есть потери Th также присущи, но в меньшей степени.

Появление U в поверхностном слое торфяной залежи (0–39 см) обусловлено как уменьшением притока и стока болотных вод в связи с выравниванием поверхности мезорельефа болота из-за активного отложения торфа в ложбине стока, так и возрастанием запыленности атмосферы в результате антропогенной деятельности. Последнее подтверждают повышение зольности до 7,1 %, высокий коэффициент корреляции U и Th (0,91) в этом слое, совпадение расчетного возраста экстремума U в слое 13–18 см (1972–1948 гг.) с периодом загрязнения атмосферы в результате массовых испытаний ядерного оружия, а также отсутствие корреляции факторов обогащения (EF) тория и урана с содержанием скандия.

Заключение

По результатам проведения исследований распределения урана и тория в ранне голоценовой глубоко залежной верховой многослойной топяной залежи разреза Болтное можно сделать следующие выводы.

Накопление U и Th в верховой топяной залежи имеет ряд особенностей: наличие достаточно мощной каймы обогащения на границе с минеральным грунтом; высокая концентрация U в слое низинного и нижнем слое верхового торфа; практически отсутствие U в основной толще верхового торфа; более низкие средние концентрации U и Th; значительное варьирование их, а также показателей U/Th, EF (U), EF (Th) по глубине разреза.

Данные особенности накопления Th и U обусловлены прежде всего положением ТР в ложбине

стока на контакте выпуклых верховиков, проточным водным режимом палеоэкотопов, а также чутким откликом участка болота на климатические изменения.

По источникам поступления, характеру и величине накопления U и Th, а также степени влияния глобальных, региональных и локальных факторов выделяются 4 стадии в процессе формирования исследованного разреза: 1) значительного обогащения отложений ураном и торием за счет поступления их из грунтовых вод и терригенного материала; 2) максимальной зависимости накопления U и Th от климатических условий, определяющих активность поступления их с аэрозолями из атмосферы, 3) максимальных потерь U и Th при формировании ложбины стока и под влиянием последствий палеокриогенных процессов; 4) зависимости накопления Uи Th от антропогенной запыленности атмосферы.

Показатели концентрации U и Th в торфяных разрезах позволяют индицировать не только степень обводненности болотных палеоэкотопов, но и характер (застойный или проточный) водного режима, что позволяет предложить их в качестве индикаторов для реконструкций водных режимов болотных палеоэкотопов и климата голоцена.

Работа выполнена по государственному заданию ИМКЭССО РАН № 121031300155-8.

Литература

1. Арбузов С. И. Среднее содержание некоторых элементов примесей в торфах юго восточной части Западно-Сибирской плиты / С. И. Арбузов, В. С. Архипов, В. К. Бернатонис и др. // Известия Томского политехнического университета, 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 44–48.
2. Арбузов С. И. Геохимия радиоактивных элементов / С. И. Арбузов, Л. П. Рихванов. – 2-е изд. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 300 с.
3. Антипина Т. Г. Природные условия и климат южной тайги Западной Сибири за последние 9000 лет по данным спорово-пыльцевого анализа водораздельного болота / Т. Г. Антипина, Ю. И. Прейс, А. Т. Галимов // XIII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатоэкологическому мониторингу: тезисы докладов российской конференции. – Томск, 2019. – С. 142–143.
4. Веретенникова Е. Э. Содержание и распределение химических элементов в торфах южнотаежнойподзоны Западной Сибири // География и природные ресурсы, 2013. – № 2. – С. 89–95.
5. Водяницкий Ю. Н. Положительные аномалии содержания урана в торфяниках гумидной зоны (обзор) / Ю. Н. Водяницкий, Н. А. Гребенкин, Д. В. Манахов, А. В. Сащенко, В. М. Тюленева) // Почвоведение, 2019. – № 12. – С. 1492–1501.
6. Григорьев Н. А. среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия, 2003. – № 7. – С. 785–792.
7. Межибор А. М. Реконструкция поступления радиоактивных элементов (U, TH) в окружающую среду Западной Сибири на основе изучения верхового торфяника / А. М. Межибор, С. А. Арбузов, Л. П. Рихванов, Прейс Ю. И., А. И. Сысо // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Международной конференции. – Томск, 2016. – С. 413–418.
8. Прейс Ю. И. Палеокриогенные процессы в торфяных отложениях юго-востока Западной Сибири / Ю. И. Прейс // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: труды Международной конференции. – Тюмень, 2015. – С. 305–308.
9. Прейс Ю. И. Динамика функционального состояния раннеголоценового болота Болтное как отклик на изменение палеоклимата (южная тайга Западной Сибири) / Ю. И. Прейс, Т. Г. Антипина, В. Н. Зенин // XIII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатоэкологическому мониторингу: тезисы докладов российской конференции. – Томск, 2019. – С. 220–221.
10. Blyakharchuk T. A. Western Siberia, a review of Holocene climatic changes / T. A. Blyakharchuk // Journal of Siberian Federal University. Biology, 1999. – № 2. – P. 4–12.
11. Krachler M., Shotyk W. Natural and anthropogenic enrichments of molybdenum, thorium, and uranium in a complete peat bog profile, Jura Mountains, Switzerland // Journal of Environmental Monitoring, 2004. – № 6. – P. 418–426.
12. Mezhibor A. M., Arbuzov S. I., Rikhvanov L. P. Accumulation and average contents of trace elements in the high-moor peat of Tomsk region (Western Siberia, Russia) // Energy exploration and exploitation, 2009. – Vol. 27. – № 6. – P. 401–410.
13. Zhilich S. V. Environmental dynamics of the Baraba forest-steppe (Siberia) over the last 8000 years and their impact on the types of economic life of the population / S. V. Zhilich, N. A. Rudaya, S. K. Krivonogov, L. B. Nazarova, D. V. Pozdnyakov // Quaternary Science Reviews, 2017. – V. 163. – P. 152–161.

РАДОНООПАСНОСТЬ АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕМАТИКИ

А. В. Пучков[1], Е. Ю. Яковлев[1], N. Hasson[2], Ю. В. Цыкарева[3],
А. С. Тышов[1], П. С. Лапиков[1], Е. В. Ушакова[4]

[1]Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова УрО РАН
Архангельск, Россия, andrey.puchkov@fciarcit.ru, evgeny.yakovlev@fciarctic.ru, tyshov@yandex.ru, pavel.lapikov.i@gmail.com
[2]Аляскинский университет
Фэрбэнкс, США, nhasson@alaska.edu
[3]Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
Архангельск, Россия, yu.cykareva@narfu.ru
[4]Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.
Саратов, Россия, katushakova96@yandex.ru

RADON HAZARD OF THE ARCTIC TERRITORIES: CURRENT STATE OF STUDY AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF RESEARCH AREA

A. V. Puchkov[1], E. Yu. Yakovlev[1], Nicholas Hasson[2], Y. V. Tsykareva[3],
A. S. Tyshov[1], P. I. Lapikov[1], E. V. Ushakova[4]

[1]N. Laverov Federal Centre for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences
Arkhangelsk, Russia, andrey.puchkov@fciarcit.ru, evgeny.yakovlev@fciarctic.ru, tyshov@yandex.ru, pavel.lapikov.i@gmail.com
[2]University of Alaska
Fairbanks, USA, nhasson@alaska.edu
[3]Northern (Arctic) Federal University
Arkhangelsk, Russia, yu.cykareva@narfu.ru
[4]Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
Saratov, Russia, katushakova96@yandex.ru

At the current moment, the issue of assessing the radon hazard of the built-up and exploited territories has been studied quite deeply. Scientists study the process of radon behavior in various conditions, improve existing ones, develop new models of radon flux to the earth's surface, create methods for assessing radon hazard, which take into account a large number of geophysical and geological predictors of this parameter. But over time, under conditions of a changing climate and the consequences of this phenomenon, new processes may arise that can have a significant impact on the behavior of radon and its flux to the surface. One of such phenomena may be the process of thawing of permafrost rocks, which are an excellent barrier for gas flows of different material compositions. In this work, we have assessed the study of the effect of permafrost on the radon flux and the prospects for further research in this scientific direction.

Введение

Быстрое потепление климата северных широт приводит к изменению ландшафтов, продуктивности растительности, таянию многомерзлотных почв (вечная мерзлота), повышению уровня мирового океана, поступлению газообразных веществ в атмосферный воздух (диоксид углерода, метан) и т. д. Такие изменения приводят к возникновению последствий для населения, инфраструктуры и экосистемы в целом. Одним из важнейших индикаторов глобального изменения климата стало явление деградации вечной мерзлоты в результате происходящего на Земле потепления. С начала 21 века начали появляться и развиваться исследовательские проекты глобального (международного) уровня по оценке продуцирования метана, углекислого газа в результате деградации мерзлоты. Было показано, что увеличивающийся уровень выхода парниковых газов в значительной степени влияет на потепление климата.

Постепенно научные проекты, касающиеся проблем в области мерзлотоведения, начинают расширяться с появлением новых научных направлений.

Еще в 1990 году были проведены работы по оценке распределения мерзлоты по результатам измерения объемной активности радона, который применялся в качестве индикатора [1]. Результаты исследований показали, что концентрация радона хорошо коррелирует с мерзлыми участками в условиях распространения мерзлоты. Низкие значения объемной активности радона были обнаружены в местах малой глубины залегания уровня мерзлоты, и наоборот, более высокие значения объемной активности радона там, где верхний уровень мерзлоты залегает доста-

точно глубоко. Учеными были сделаны выводы, что вечная мерзлота оказывает значительное влияние на динамику распределение радона.

В 2006–2008 гг. учеными Канады и Великобритании [2, 3] были проведены теоретические исследования по оценке влияния многолетнемерзлых пород на объемную активность радона в условиях здания. По результатам данных исследований были разработаны предварительные модели, показывающие факт увеличения поступления радона на поверхность, в том числе и в здания, в процессе деградации мерзлоты. Было рассчитано, что при среднемировом содержании радия-226 в почве с удельной активностью 40 Бк/кг, слой вечной мерзлоты в 13 м может приводить к уменьшению объемной активности в здании до 10–15 Бк/м^3 (модель невентилируемого помещения). Однако в результате таяния вечной мерзлоты уровень объемной активности может возрасти до 100 раз (1000–1500 Бк/м^3). Данный факт учеными предложено принять во внимание с учетом установленного контрольного уровня объемной активности радона от 100 до 300 Бк/м^3 (для разных стран), а также с учетом крайне негативного влияния радона на заболеваемость онкологической природы.

Значительное влиянии уровня сезонного промерзания грунта (до 1 м) в зимнее времяна эманирование радона на поверхность земли было отмечено российскими учеными [4–6]. По результатам данных исследований были дополнены соответствующие методические указания с критериями оценки потенциальной радоноопасности с учетом уровня промерзания грунта.

Помимо вышеперечисленных исследований в научной литературе крайне мало встречается публикации с результатами изучения двух возможно-связанных явлений: оттаивание многолетнемерзлых пород и потока радона на поверхность земли. Но несмотря на это, факт барьерной функции мерзлоты и повышенный поток радона в случае ее деградации является очевидным, но требующим практического доказательства. Для этого нами предлагается два варианта развития тематики: во-первых, заложение экспериментальной площадки, имитирующей мерзлые породы, процесс их естественного оттаивания, вследствие чего происходит повышение объемной активности радона в почве; во-вторых, проведение полевых исследований на ключевых территориях, характеризующихся распространением вечной мерзлоты и наличием пород и грунтов с повышенным содержанием естественных радионуклидов.

Материалы и методы

На текущий момент нами создана экспериментальная площадка, имитирующая мерзлые породы с искусственно внесенным на глубину 1,5 м активным слоем. В данном случае активный слой представлен грунтами и горной породой, содержащими повышенное содержание радия-226 (от 60 до 100 Бк/кг) и характеризующиеся коэффициентом эманирования радона не менее 15 %. В целом модель представляет из себя цилиндрический контейнер, состоящий из двух слоев: активный слой и слой грунтов с пониженным содержанием радия-226 (не более 10 Бк/кг). После заполнения контейнера водой замораживание всей модели происходило в естественных условиях в течение 1 недели (температура воздуха не поднималась выше –25 °С.

Для изучения процесса потока радона в условиях постепенного оттаивания модели нами определены следующие постоянные параметры: удельные активности радия-226 в каждом слое, пористость и плотность слоев в условиях отсутствия льда, уровень продуцирования радона в каждом слое, геометрические размеры модели.

В период с марта по июль 2021 года нами ежедневно определяются следующие параметры: плотность потока радона на поверхности, температура почвы на поверхности, а также на глубинах 0,5; 1,0; 1,5 м, глубина залегания льда, температура, влажность и давление окружающей воздуха.

Основными методами исследования в рамках эксперимента являются следующие:

- гамма-спектрометрический с применением низкофонового полупроводникового гамма-спектрометра ORTEC (США) на основе коаксиального детектора GEM10P4-70 из особо чистого германия (HPGe) с цифровым анализатором DSPEC LF и программным обеспечением MAESTRO-32 и GAMMA-VISION-32;
- радиометрический (эманационный) с применением комплекса по мониторингу за радоном «Альфарад Плюс – АР» (Россия).
- вспомогательные средства измерения и оборудование для определения физических параметров проб: пористость и плотность.

Результаты и их обсуждение

В настоящий момент нами получены результаты измерений плотности потока радона за период с 1 марта по 15 мая 2021 года. По результатам измерений температуры почвы по состоянию на 15.05.2021 наблюдаются отрицательные температуры на глубине 0,5 м (–0,1 °С). Соответственно, активный слой, заложенный на глубинах 1,3–1,5 м еще находится в мерзлом состоянии.

Первичные результаты измерений плотности потока радона за два с половиной месяца приведены на рисунке 1. Уже можно отметить, что в условиях оттаивания грунтов с пониженным содержанием радия-226 происходит постепенное повышение значения потока радона на поверхности. Причем наглядно показано, что повышение данного параметра произошло через 1–2 дня после установившихся положительных температур воздуха и верхнего слоя по-

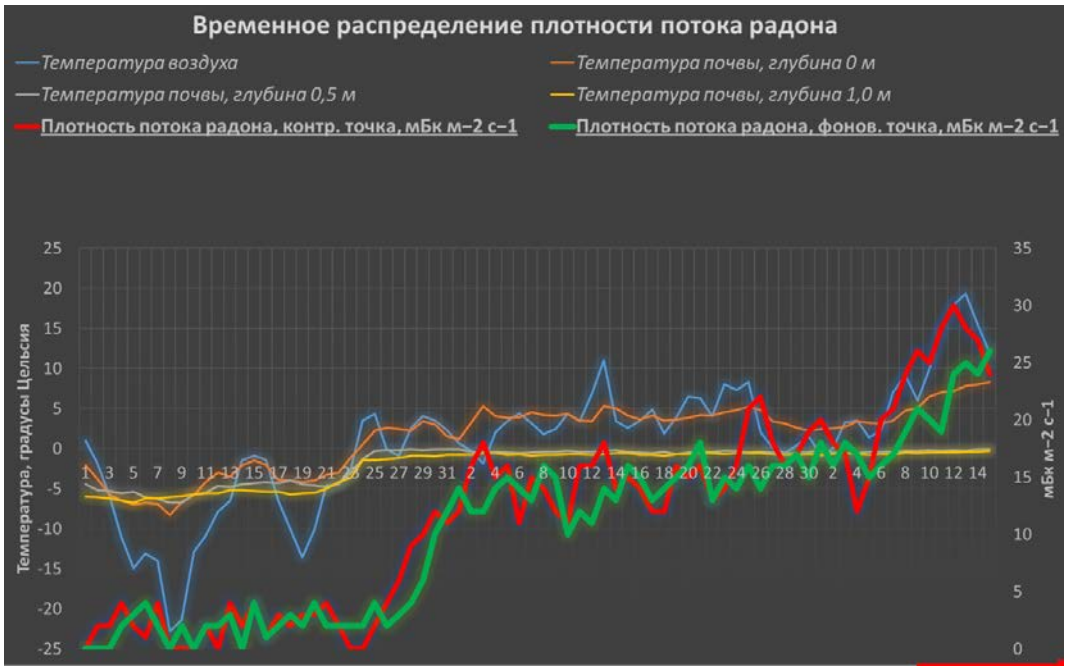


Рис. 1. Временное распределение плотности потока радона в период с 1 марта по 15 мая 2021 года

чвы (конец марта – начало апреля), а также в момент резкого повышения температуры воздуха и почвы в начале мая.

В дальнейшем (ориентировочно в июле 2021 года) мы предполагаем, что спустя 2–4 дня после оттаивания активного слоя и удаления талой воды через подготовленную в контейнере дренажную систему произойдет скачок значений плотности потока радона.

Заключение

Приведенные в настоящей работе немногочисленные факты и теоретические предпосылки по влиянию процесса оттаивания мерзлоты на увеличение потока радона на поверхность земли показывают актуальность и необходимость проведения полноценных фундаментальных научно-исследовательских работ, направленных на подтверждение выдвинутой теории.

В рамках данной работы нами предложено два варианта подтверждения гипотезы существования барьерной функции мерзлоты для радона: во-первых, заложение экспериментальной площадки, имитирующей мерзлые породы, процесс их естественного оттаивания, вследствие чего происходит повышение объемной активности радона в почве; во-вторых, проведение полевых исследований на ключевых территориях, характеризующихся распространением вечной мерзлоты и наличием пород и грунтов с повышенным содержанием естественных радионуклидов.

На основе полученных результатов в рамках проведенного эксперимента нами будет создана теоретическая модель процесса поведения радона в условиях залегания мерзлых грунтов и их естественного оттаивания.

Параллельно экспериментальной работе нами прорабатываются ключевые участки для проведения полевых исследований на тех территориях, где происходит процесс поступательной деградации мерзлоты, а также характеризующихся наличием грунтов и горных пород с повышенным содержанием естественных радионуклидов.

В случае получения успешных (подтверждение выдвинутой гипотезы) результатов экспериментальных, а в дальнейшем и полевых работ, крайне важным и необходимым станет пересмотреть существующие способы и методы оценки радоноопасности застраиваемых территорий, которые находятся в зоне распространения вечной мерзлоты.

Работа выполняется при поддержке гранта «Повышение концентрации радона в условиях деградации мерзлоты: постановка эксперимента и математическая модель», предоставленного Проектным офисом развития Арктики по договору № 245-Г от 19.04.2021, а также гранта Российского Научного Фонда № 20-77-10057 «Диагностика деградации мерзлоты на базе изотопных трассеров (234U/238U, δ18O+δ2H, δ13C+14C)»

Литература

1. Sellmann P. V., Delaney A. J. Radon measurements as indicators of permafrost distribution // Cold regions science and technology, 1990. – Т. 18. – № 3. – С. 331–336.
2. Glover P. W. J. Increased domestic radon exposure caused by permafrost thawing due to global climate change, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 2–7 April. – EGU06-A-01439, 2006.
3. Glover P. W. J., Blouin M. Modelling increased soil radon emanation caused by instantaneous and gradual permafrost thawing due to global climate warming, 2007.
4. Березина Е. В., Еланский Н. Ф. Концентрация ^{222}Rn в приземном слое атмосферы над континентальной территорией России по наблюдениям в экспериментах TROICA // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана, 2009. – Т. 45. – № 6. – С. 809–822.
5. Березина Е. В. и др. Оценка биогенных эмиссий ch 4, co 2 и сухого осаждения o 3 по измерениям ^{222}Rn в экспедициях troica // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана, 2014. – Т. 50. – № 6. – С. 663–663.
6. Климшин А. В. и др. Влияние промерзания поверхностного слоя грунтов на перенос радона // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле, 2010. – Т. 16. – № 2. – С. 146–151.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ АТМОСФЕРНЫХ ВЫНОСОВ УРАНА С ТЕРРИТОРИЙ ХВОСТОХРАНИЛИЩ

В. Ф. Рапута[1], Д. В. Юсупов[2], Т. В. Ярославцева[3], Л. А. Дорохова[4]

[1]Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
Новосибирск, Россия, raputa@sscc.ru
[2]Амурский государственный университет
Благовещенск, Россия, yusupovd@mail.ru
[3]Новосибирский институт гигиены Роспотребнадзора
Новосибирск, Россия, tani-ta@list.ru
[4]Институт геологии и природопользования ДВО РАН
Благовещенск, Россия, liubov.ad@yandex.ru

EXPERIMENTAL STUDIES AND NUMERICAL ANALYSIS OF ATMOSPHERIC PROCESSES OF URANIUM REMOVAL FROM TAILINGS

V. F. Raputa[1], D. V. Yusupov[2], T. V. Yaroslavtseva[3], L. A. Dorokhova[4]

[1]Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB of RAS
Novosibirsk, Russia, raputa@sscc.ru
[2]Amur State University
Blagoveshchensk, Russia, yusupovd@mail.ru
[3]Novosibirsk Research Institute of Hygiene, Rospotrebnadzor
Novosibirsk, Russia, tani-ta@list.ru
[4]Institute of Geology and Nature Management FEB RAS
Blagoveshchensk, Russia,liubov.ad@yandex.ru

Models and methods for estimating the concentration fields of impurities near dusty areal sources are discussed. The main ratio is the ratio of the balance of the mass of light impurities in the surface layer of the atmosphere. The results of approbation of the proposed approach on the data of biomonitoring of uranium in the region of Krasnokamensk (Trans-Baikal Territory) and Novosibirsk are presented. Directions for removal of suspended solids from the tailing dump of the Priargunsky ore mining and processing plant and the Novosibirsk plant of chemical concentrates, estimates of the fields of uranium concentrations in the poplar leaves were obtained.

Введение

Оценка состояния загрязнения атмосферного воздуха, в принципе, может быть выполнена достаточно независимо, как по данным наблюдений, так и с использованием методов математического моделирования. Но во многих практических ситуациях наиболее реальным является совместное использование результатов измерений и моделирования, описывающего в стилизованном виде распростране-

ние загрязнений в воздушной среде. В этом случае модели оценивания, объединяющие информацию об источниках выбросов и закономерностях рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере, являются удобным инструментом не только для оценки существующих уровней загрязнения, но также для прогноза будущего состояния воздушного бассейна.

Процессы загрязнения атмосферы и поверхности земли в результате ветровой миграции примеси от неорганизованных площадных источников до сих пор изучены недостаточно и зависят от значительного числа факторов, обладающих большой изменчивостью [1–3]. К ним в первую очередь следует отнести текущую эмиссию источников и эффективную высоту подъёма примеси, дисперсный состав аэрозольных частиц. Эти величины в свою очередь зависят от метеорологических условий, состояния почвенного и растительного покрова, прочности сорбции примеси с поверхностью и т. д. Также недостаточно полно изучены механизмы ветрового подъёма примеси с подстилающей поверхности [4–6]. В сложившейся ситуации проведение прямого моделирования процессов распространения примеси весьма затруднительно [4, 7–9]. С другой стороны, проблематично получить достоверную картину загрязнения территорий лишь на основе данных наблюдений, что в значительной степени связано с их недостаточностью и фрагментарностью.

Целью данного исследования является изучение процессов атмосферных выносов урана от хвостохранилищ в окрестностях г. Краснокаменска Забайкальского края и в северо-восточной части г. Новосибирска по данным изучения листьев тополя – биогеохимического индикатора, и разработка методов численной интерпретации результатов экспериментальных исследований атмосферного загрязнения под воздействием нерегулярных наземных источников.

Материалы и методы

В качестве предпочтительного объекта исследования выбраны листья тополя бальзамического (*Populus balsamifera L.*) и черного (*Populus nigra L.*), поскольку древесная растительность рода тополь широко используется для озеленения селитебных и промышленных зон городов. Выбор этого объекта позволяет обеспечить пробоотбор по относительно равномерной сети и заданным направлениям. Диагностика элементного состава листьев древесных растений относится кинформативным биогеохимическим методам [10]. Листья являются распространённым природным планшетом, способным эффективно улавливать атмосферные аэрозоли.

В 2014 г. на территории г. Краснокаменска и его окрестностях отобрано и обработано 25 проб листвы тополя. Пробы проанализированы инструментальным нейтронно-активационным методом анализа (аналитик А. Ф. Судыко), проведены электронно-микроскопические исследования вещественного состава в Томском политехническом университете. Схема отбора проб представлена на рис. 1 А.

В соответствии с функциональным назначением данной территории и специализацией источников эмиссии урана выделяется селитебная и промышленная зона. В селитебную зонувходит урбанизированная часть г. Краснокаменска и прилегающие поселки. Промышленная зона представлена крупным горнопромышленным комплексом Приаргунского производственного горно-химическогообъединения, разрабатывающего с 1968 г. урановые месторождения Стрельцовского рудного узла.

Стрельцовский рудный узел, включающий около 2-х десятков месторождений, расположен в пределах Аргунского срединного массива, характеризуется уникальными запасами урана и высоким качеством руд. В горнопромышленный комплекс входит ряд объектов основного и вспомогательного производ-

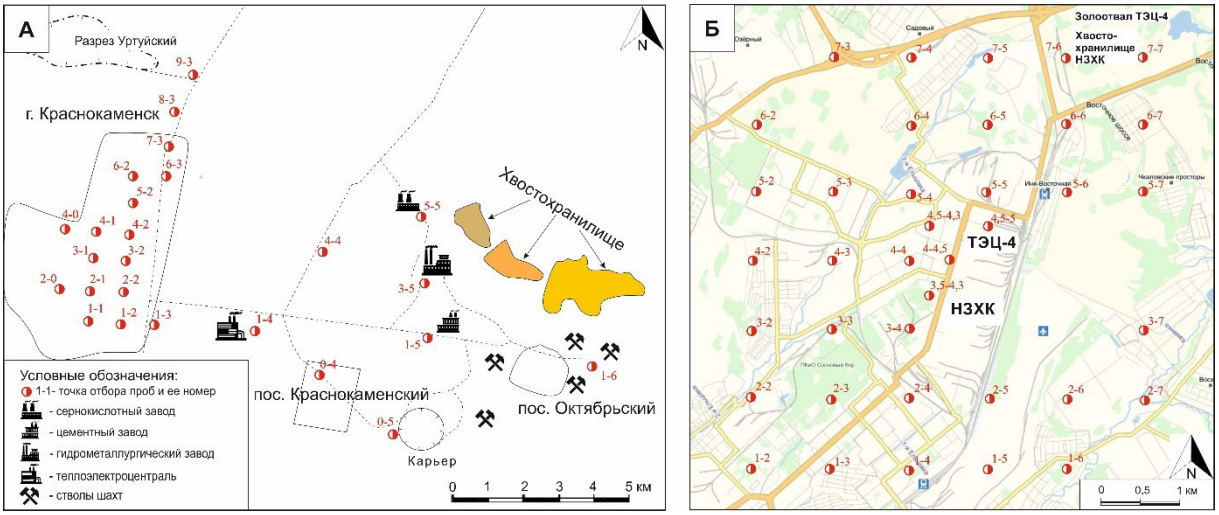


Рис. 1. Схемы отбора листьев тополя в зоне влияния горно-промышленного комплекса Стрельцовского рудного узла (А); в северо-восточной части г. Новосибирска (Б)

ства: рудники, шахты, гидрометаллургический, сернокислый и цементный заводы, хвостохранилища, угольный разрез «Уртуйский», теплоэлектростанция и др., оказывающие существенное техногенное воздействие на компоненты окружающей среды [11].

На рис. 1 Б представлена схема отбора листьев тополя в 2017 г. в северо-восточной части г. Новосибирска в 38 точках по сетке 1 × 1 км и с определёнными сгущениями 0,5 × 0,5 км. Пробы анализировались указанными выше методами. Достаточно плотная сеть отбора позволяет провести детальное изучение процессов выноса урана от возможных источников.

Для численной интерпретации полученной экспериментальной информации целесообразно использование соотношений, описывающих процессы переноса примесей в атмосфере от точечных и площадных источников, в рамках постановок обратных задач. Для расчёта полей концентраций примеси обычно используется в разных модификациях следующее уравнение [12]

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u\frac{\partial q}{\partial x} + v\frac{\partial q}{\partial y} + w\frac{\partial q}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x}k_x\frac{\partial q}{\partial x} - \\ - \frac{\partial}{\partial y}k_y\frac{\partial q}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z}k_z\frac{\partial q}{\partial z} + aq = F(t, \vec{x}) \quad (1)$$

с дополнительными граничными и начальными условиями.

Здесь оси x и y направлены в горизонтальных направлениях, ось z в вертикальном, t – временная переменная, u, v, w – составляющие скорости ветра вдоль осей x, y, z; k_x, k_y, k_z – коэффициенты турбулентного обмена, α определяет трансформацию примеси за счет превращений; F – функция, описывающая пространственно-временную структуру источников в области Ω.

Базовой формулой для расчета длительного загрязнения является соотношение [13, 14]

$$\bar{q}_{\bar{\tau}} = \int_0^\infty q\rho_{\tau,\bar{\tau}}(q)dq, \quad (2)$$

устанавливающее связь между концентрацией $\bar{q}_{\bar{\tau}}$ за длительный период времени $\bar{\tau}$ и q – разовыми концентрациями за интервал времени $\tau << \bar{\tau}$; $\bar{\rho}_{\tau,\bar{\tau}}$ – плотность вероятности распределения разовых концентраций. Значение $\bar{q}$ определяется из решения уравнения турбулентной диффузии (1).

В случае легкой примеси, с учетом (1)–(2), следует [13]

$$\bar{q}(r, \varphi) = \frac{\theta_1 P(\varphi + 180°)}{r^2} \bullet e^{\frac{-\theta_2}{r}}. \quad (3)$$

Здесь r, φ – полярные координаты расчётной точки. Агрегированные комплексы параметров θ_1, θ_2 оцениваются по данным наблюдений с использованием метода наименьших квадратов. В частном случае, по измерениям в двух точках их можно определить из решения соответствующей системы уравнений.

Замечание. На значительных удалениях от источника (порядка 10 км) изменение концентрации с расстоянием r приближается к следующей зависимости [14]

$$\bar{q}(r, \varphi) = \frac{\theta \bullet P(\varphi + 180°)}{r},$$

где оценка неизвестного параметра θ проводится по экспериментальным данным.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены результаты биогеохимического мониторинга урана в г. Краснокаменске и прилегающей к нему промышленной зоне. Расположение точек отбора проб лиственного материала приведено на рис. 1 А.

Предварительное рассмотрение данных табл. 1 позволило выявить определённую динамику уменьшения содержания урана в листьях с удалением от хвостохранилища в западном и северо-западном направлениях. Западное направление включает точки отбора проб: (1-5), (0-4), (1-4), (1-3), (1-2), (1-1). Северо-западное направление содержит точки: (3-5), (4-4), (8-3), (6-2), (9-3). Обнаруженные закономерности дали основания для более углублённого численного анализа данных биомониторинга в указанных выше направлениях. На рис. 2 приведены результаты численного восстановления концентраций урана с использованием модели (3).

Использование предположения о малой высоте подъёма примесей позволило внести дополнительное упрощение в модель (3). В этом случае множи-

Таблица 1. Содержание урана (мг/кг) в золелистьев тополя в точках отбора на территории г. Краснокаменска и его окрестностей

Номер точки	U	Номер точки	U	Номер точки	U	Номер точки	U	Номер точки	U
0-4	1,84	1-4	1,27	3-1	0,46	4-1	0,84	6-2	0,44
0-5	3,70	1-5	12,16	3-2	0,17	4-2	5,93	6-3	3,64
1-1	0,12	1-6	5,01	3-5	4,20	4-4	1,28	7-3	0,76
1-2	0,42	2-0	0,16	4-0	0,99	5-2	2,12	8-3	0,31
1-3	0,82	2-1	1,35	4-1	0,84	5-5	6,89	9-3	0,20

тель $e^{-\theta_2/r}$ близок к единице на сравнительно небольших расстояниях от источника и можно ограничиться при проведении оценивания по направлению одной точкой наблюдения. Анализ рис. 2 показывает вполне удовлетворительное согласие результатов моделирования данным измерений.

Данные биогеохимического мониторинга территории Новосибирска показали наличие повышенных концентраций урана в северо-восточной окраине города, связанных с близостью хвостохранилища Новосибирского завода химконцентратов (НЗХК) и золоотвала ТЭЦ-4 (рис. 1 Б). Наличие достаточного количества точек наблюдений на маршрутах южных направлений указывает на возможность использования для численного анализа модель реконструкции в виде соотношения (3). В табл. 2 приведено сравнение результатов оценивания по модели (3) с данными измерений концентраций урана на двух маршрутах наблюдений. При этом также использовалось предположение о малой высоте источника. Но в отличие от предыдущего примера проводились оценки, связанные с локализацией положения источника выносов урана. В этом случае были использованы дополнительные опорные точки наблюдений.

Анализ табл. 2 показывает достаточно высокий уровень согласия расчётов данным биогеохимического мониторинга в контрольных точках наблюдений. Определённые расхождения могут быть связаны с несовпадением положения источника с направленностью маршрутов отбора проб.

Заключение

Результаты проведённых исследований подтверждают возможность использования индикаторных свойств листьев тополя для оценивания загрязнения окружающей среды при атмосферном переносе аэрозольных примесей. Совместный анализ экспериментальных исследований и данных численного моделирования позволяет оценить радиоэкологическую ситуацию на определённых территориях, выявлять и контролировать источники выносов урана. В перспективе, это создает возможности для разработки соответствующих геоинформационных систем. Для дальнейшего развития эффективных моделей оценивания атмосферного загрязнения от наземных источников необходимо создание информативных сетей биогеохимического мониторинга.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области (проект № 19-47-540008).

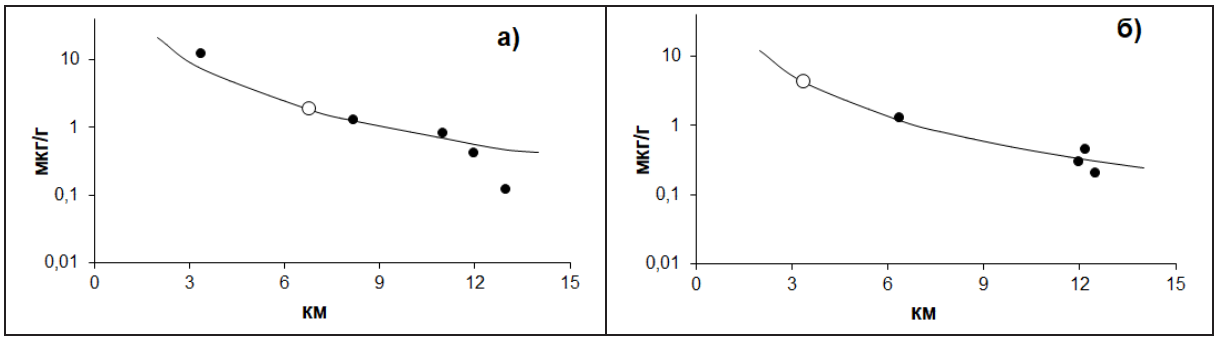


Рис. 2. Измеренные и численно восстановленные содержания урана в западном направлении (а) и в северо-западном направлении от хвостохранилища Приаргунского горно-химического комбината (б)

Светлые и тёмные кружки: опорные и контрольные точки измерений, ____ – результаты моделирования.

Таблица 2. Измеренные и рассчитанные концентрации урана (мг/кг) в юго-западных направлениях выноса от хвостохранилища НЗХК и золоотвала ТЭЦ-4 г. Новосибирска

Номер точки	Расстояние от источника, км	Измерение/ расчёт	Номер точки	Расстояние от источника, км	Измерение/ расчёт
(7-7)*	0,8	10,2/10,2	(7-6)*	1,31	2,08/2,08
(6-6)*	2,04	1,54/1,54	(6-5)*	2,57	0,54/0,54
(5-5)	3,37	0,81/0,55	(5-4)	3,90	0,34/0,24
(4-4)	4,63	0,31/0,31	(4-3)	5,16	0,15/0,13
(3-3)	5,89	0,21/0,19	(3-2)	6,49	0,05/0,09

точки, помеченные значком – *, являются опорными.

Литература

1. Бютнер Э. К. Динамика приповерхностного слоя воздуха/ Э. К. Бютнер. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 159 с.
2. Трансурановые элементы в окружающей среде / Под ред. У. С. Хэнсона. – М.: Энергоатомиздад, 1985. – 344 с.
3. Сафонов А. В. Биогенные факторы формирования геохимических урановых аномалий в районе шламохранилища Новосибирского завода химконцентратов / А. В. Сафонов, А. Е. Богуславский, К. А.Болдырев, Л. В. Зайцев// Геохимия, 2019. – Т. 64. – № 6. – С. 644–650.
4. Хуршудян Л. Г. Об особенностях расчёта загрязнения воздуха некоторыми промышленными источниками неорганизованных выбросов пыли / Л. Г. Хуршудян // Мониторинг загрязнения атмосферы в городах: сб. науч. тр. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. – С. 108–120.
5. Возженников О. И. О переносе примеси в атмосфере при ветровом подхвате с подстилающей поверхности / О. И. Возженников, А. В. Нестеров // Метеорология и гидрология, 1988. – № 11. – С. 63–70.
6. Горчаков Г. И. Влияние ветра на вынос аэрозоля с подстилающей поверхности / Г. И. Горчаков, Б. М. Копров, К. А. Шукуров // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2004. – Т. 40. – № 6. – С. 759–775.
7. Ярославцева Т. В. Модели оценивания аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха от наземного площадного источника / Т. В. Ярославцева, В. Ф. Рапута // Ползуновский вестник, 2005. – № 4 (Ч. 2). – С. 125–130.
8. Liu M. A study of the sensitivity of simulated mineral dust production to model resolution / M. Liu, D. L. Westphal // J. Geophys. Res., 2001.– V. 106. – № D16. – P. 18099–18112.
9. Рапута В. Ф. Закономерности пылевого загрязнения окрестностейх востохранилищ / В. Ф. Рапута, А. А. Айриянц, С. Б. Бортникова, И. А. Суторихин // Оптика атмосферы и океана, 2002. – Т. 15.– № 8. – С. 740–743.
10. Юсупов Д. В. Радиоактивные элементы (торий, уран) в листьях тополя на урбанизированных территориях и их индикаторная роль / Д. В. Юсупов, Л. П. Рихванов, А. Ф. Судыко, Н. В. Барановская, Л. А.Дорохова // Разведка и охрана недр, 2019. – № 2. – С. 61–68.
11. Величкин В. И., Чуднявцева И. И. Ландшафтно-геохимические исследования при оценке радиоэкологического состояния окружающей среды в зоне влияния урандобывающего и перерабатывающего комплекса (на примере Стрельцовского Mo–U рудного поля / В. И. Величкин, И. И. Чуднявцева // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2009. – № 2. – С. 99–114.
12. Бызова Н. Л. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси / Н. Л.Бызова, Е. К. Гаргер, В. Н. Иванов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 279 с.
13. Берлянд М. Е. Теоретические основы и методы расчёта поля среднегодовых концентраций примесей от промышленных источников / М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, С. С. Чичерин // Труды ГГО, 1984. – Вып. 479. – С. 102–110.
14. Рапута В. Ф. Модели реконструкции полей длительных выпадений аэрозольных примесей / В. Ф. Рапута // Оптика атмосферы и океана, 2007.– Т. 20. – № 6. – С. 506–511.

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ ИЗУЧЕНИЯ ПРОШЛОГО РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ

Ю. В. Робертус

Институт водных и экологических проблем СО РАН
Барнаул, Россия, ariecol@mail.gorny.ru

RADIOGEOCHEMICAL SPECIALIZATION IN K AND Th – THE MAIN RESULTS OF THE STUDY OF THE PAST RADIOACTIVE CONTAMINATION OF THE ALTAI REPUBLIC

Yu. V. Robertus

Institute of Water and Environmental Problems SB RAS
Barnaul, Russia, ariecol@mail.gorny.ru

The main data on the consequences of past tests of nuclear devices on the territory of the Republic of Altai (RA) was obtained in 1993–1998 as part of a set of urgent measures, and since 1996 – the federal target program. These works were carried out in the "rear guard" of the previously initiated study of the medical and environmental consequences of nuclear explosions at the Semipalatinsk test site (SIP) in the Altai Territory (the federal program "Semipalatinsk test site – Altai") and therefore were of a more short-term nature with incomplete coverage of the territory of the Republic of Armenia, the spectrum of long-lived technogenic radionuclides (TRN) and components of the natural environment (mainly soil cover).

Введение

Оценка остаточного радиоактивного загрязнения территории региона проведена с участием институтов СО РАН (ОИГГМ, ИВЭП), госпредприятия «Алтай-Гео» и частично НИИ РГ (г. Санкт-Петербург). Реконструкция доз облучения проведена институтами Минобороны РФ (НИИ ЭМПФиМТ, ЦФТИ, НПО «Уран»), НИИ РГ (г. Санкт-Петербург), ПГО «Запсибгеология» и «Березовгеология».

Многолетняя работа по реконструкции доз внешнего облучения населения республики проведена под руководством профессора, д.м.н. Н. А. Мешкова (НИИ ЭМПФиМТ МО РФ). В дальнейшем, заметный вклад в изучение радиоэкологических последствий ядерных испытаний в регионе внесли сотрудники кафедры геоэкологии ТПУ под руководством профессора, д.г.-м.н. Л. П. Рихванова.

Ядерные взрывы, оказавшие воздействие на территорию и население региона. Число ядерных взрывов на СИП, радиоактивные осадки от которых оказали воздействие на территорию и население РА, варьируется по разным авторам от 18 до 57 единиц. Так, по данным математического моделирования НПО «Уран» реконструированы следы 22 взрывов [1]. По направлению господствующих ветров во время испытаний (азимут 65–105°) на территории региона можно предполагать наличие следов 30 (рис. 1).

Ретроспективным анализом архивных геологических материалов периода воздушных и наземных испытаний ядерных устройств на СИП (1949–1962 гг.) достоверно установлено более 70 случаев аномальных повышений радиационного поля интенсивностью до тысяч мкР/час, фиксирующих следы 18 взрывов, в т. ч. взрыва 29.08.1949 г. В эти и последующие годы на территории РА, отстоящей от СИП на расстоянии 300–650 км, было выявлено 80 разных по размерам и интенсивности очагов прошлого радиоактивного загрязнения почвенного покрова. Кроме того, были зафиксированы следы ряда подземных ядерных взрывов на полигоне в 1965–1969 гг. [5].

По данным [1, 2] основной вклад в формирование радиоактивного загрязнения территории РА внесли взрывы на СИП: 12 и 23 августа 1953 г.; 23 октября 1954 г.; 24 августа 1954 г.; 24 августа 1956 г.; 18 августа, 9 и 14 октября 1962 г.

Прошлые и современные уровни радиоактивного загрязнения региона долгоживущими ТРН (^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{239,240}Pu) обусловлены как глобальными атмосферными выпадениями, так и локальными выпадениями на следах радиоактивных облаков наземных и воздушных ядерных взрывов на СИП в 1949–1962 гг., а южной части РА частично и локальными выпадениями при испытаниях на полигоне Лобнор (КНР).

Исследованиями 1990-х гг. установлена высокая вариабельность содержания ТРН (на примере ^{137}Cs) и сложно построенный мозаично-очаговый характер их распределения на территории РА, в целом совпадающий со следами прохождения облаков от ядерных взрывов и очагами наложенного радиоактивного загрязнения. Практически полное отсутствие аэронаблюдений со стороны радиационной службы СИП за этими облаками и их «растаскивание» горно-

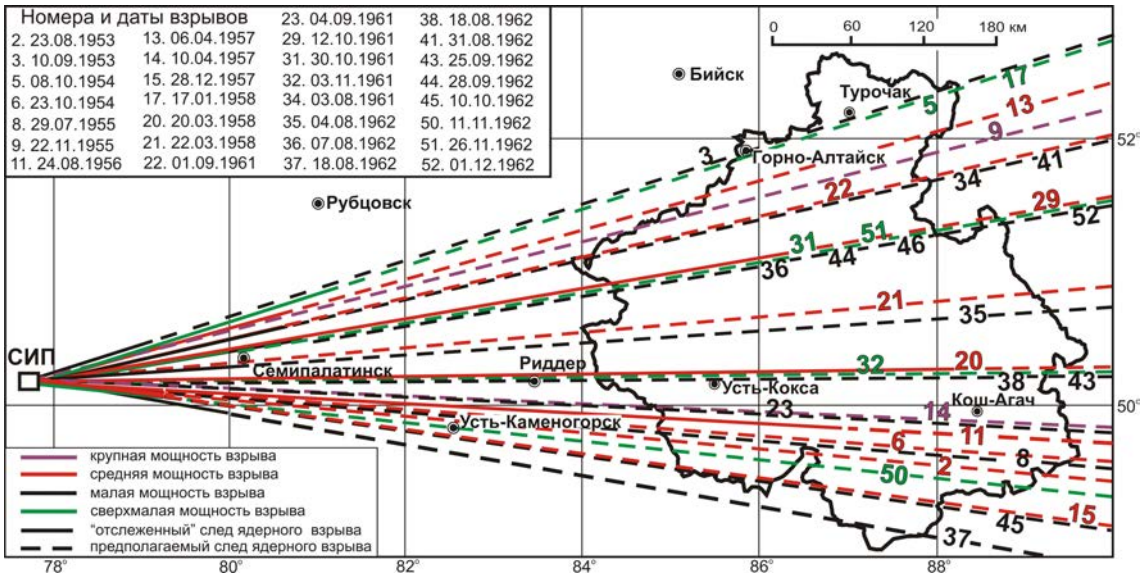


Рис. 1. Ядерные взрывы на СИП, предположительно оказавшие воздействие на РА

Таблица 1. Плотность осадка и запасы ТРН в почвенном покрове Республики Алтай

ТРН	Активность, Бк/кг		Средняя плотность, мКи/км^2		Запасы ТРН, Ки	
	ГВ	ЛВ	ГВ	ЛВ	Исходные*	Остаточные**
^{137}Cs	5–40	10–360	55	130,0	24150	8600
^{90}Sr	1–25	7–68	30	40	7400	3250
^{239,240}Pu	0,2–0,3	0,4–3,4	0,35	1,4	130	130

ГЛ, ЛВ – глобальные, локальные выпадения; * – реконструированные запасы; ** – 2020 г. с ГВ.

долинными воздушными потоками предопределило вероятностный характер картографированных следов на территории региона [5].

Уровни загрязнения почв региона ТРН на начало 1990-х гг. варьировались в больших пределах (табл. 1), однако их повышенные концентрации тяготеют в основном к осевым зонам горных хребтов и заболоченным днищам межгорных впадин, то есть к местам выпадения наибольших количеств осадков и участкам их аккумуляции.

Максимальная активность ^{137}Cs на территории РА установлена в донных осадках озер – до 388 мКи/км^2 (оз. Манжерокское), во мхах, в т. ч. в ягеле – до 150 Бк/кг, в растительной подстилке и хвойном опаде – до 500 Бк/кг, в грибах – до 777 Бк/кг [1].

Следует отметить, что содержание и распределение ^{90}Sr и ^{239,240}Pu в почве оценено на небольшом числе проб на ограниченной территории РА. Установлено, что основные запасы осадка ^{137}Cs сосредоточены в гумусовом горизонте почв в интервале 0–0,2 м (80–90 % запасов в интервале 0–10 см), а глубина проникновения ^{90}Sr в почвенном профиле достигает 0,5–1 м [6].

Для глобальных и локальных выпадений характерны различные отношения долгоживущих ТРН в почве. Так, отношение ^{137}Cs/^{90}Sr равно 3,5 и для локальных выпадений оно более чем в два раза выше, чем для глобальных (табл. 2).

Все техногенные радионуклиды имеют отрицательные и незначимые связи с естественными радионуклидами (ЕРН), что указывает на различные источники их поступления в почвы – местном для ЕРН и наложенным для ТРН [6].

Исходные запасы ТРН на территории РА в целом соответствуют суммарной инжектированной радиоактивности на следах ядерных взрывов (на примере взрыва 12.08.1953 г.). Их отношение в ряду ^{137}Cs–^{90}Sr–^{239,240}Pu составляет 185–57–1.

Дополнительные сведения о прошлом радиоактивном загрязнении региона были получены в 2000-е гг. при изучении стратифицированных природных образований – годовых колец деревьев, ледниковых и донных отложений [3, 4, 7]. Так, по данным изучения годовых колец хвойных деревьев методом осколочной радиографии (F-радиографии) достоверно зафиксировано выпадение делящихся радионуклидов на территории региона, начиная с 1950-х годов, время поступления и положение которых в целом удовлетворительно совпадают с реконструированными и измеренными радиоактивными следами [3].

В частности, почти во всех изученных спилах отчетливо устанавливается выпадение ТРН из радиоактивных облаков при наземных и воздушных (1953 г., 1955 г., 1961 г., 1962 г. и др.), а также экскавационных (1965 г.) ядерных испытаниях на СИП.

Кроме «семипалатинских» следов, на кривых распределения плотности треков в спилах из южной части РА отчетливо видна серия интенсивных максимумов, отвечающих 1970–1980-м годам, которыми проявились радиоактивные следы более мощных ядерных испытаний на полигоне Лобнор (КНР).

Следует отметить, что современный региональный фон треков делящихся элементов на территории РА в среднем в 2 раза выше, а на юге региона – в 3 раза выше, чем до ядерных испытаний (рис. 2).

Радиоактивные следы испытаний ядерных устройств на СИП, в меньшей степени на полигоне Лобнор, запечатлены и в ледниках Горного Алтая. В частности, период наземных и воздушных ядерных взрывов на СИП отчетливо проявился в талой воде ледника Большой Актру (Северо-Чуйский хребет) аномально повышенными (до 30 фонов) концентрациями йода – одного из продуктов деления радиоактивных материалов [4].

Реконструкция доз внешнего облучения территории и населения региона в период испытаний ядерных устройств на СИП проводилась следующими методами: методом математического моделирования; методом восстановления доз облучения по плотности осадка ^{137}Cs в почве; биофизическим методом оценки дозы облучения по ЭПР-сигналу в эмали зубов; термолюминесценции кварцевых включений в строительной керамике [1].

В качестве дополнительных методов оценки доз внешнего облучения применялись: цитогенетические методы (хромосомные аберрации, микроядерный тест и др.); данные измерения β-активности атмосферных выпадений на метеостанциях региона и наземные измерения МЭД геологической службой во время прохождения радиоактивных облаков. Последние частично восполняют отсутствие радиационного сопровождения со стороны СИП. Этим наиболее достоверным методом определены примерные дозы облучения от 12 взрывов в 70 пунктах на территории региона [5].

Сравнение данных по реконструированным дозам внешнего облучения территории региона свидетельствует об их удовлетворительном совпадении (табл. 2), кроме доз, полученных методом математического моделирования, которые на два порядка ниже определенных инструментальными методами и реконструированные по осадку ^{137}Cs в почве [1].

Максимальные дозы облучения, определенные по графикам МЭД, измеренным геологическими партиями на следах конкретных радиоактивных облаков, варьируются в больших пределах. В среднем они составляли в разных частях региона 0,2 сЗв и нередко достигали на значительной его территории значений 0,5 сЗв и более [5].

По данным прошлых измерений МЭД можно также отстроить положение следов отдельных взрывов и уточнить распределение в их контуре доз внешнего облучения, как это сделано для взрыва 12.08.1953 г. Следует отметить, что реконструированные по этому методу дозы на следах всех изученных

Рис. 2. Плотность треков от осколков деления ^{235}U и трансурановых элементов в годовых кольцах сосны (с. Турочак) и лиственницы (с. Джазатор)

Таблица 2. Радиационно-гигиеническая оценка реконструированных доз облучения (сЗв)

Дозы облучения	Математическое моделирование	По осадку в почве ^{137}Cs	ТЛ кварца в керамике	ЭПР-спектроскопия зубной эмали	По измеренной МЭД на следе*
Максимальная	1,47	47,8	35,0	47,4	1,5
Средняя	0,47	27,8	13,4	20,8	0,2
Число пунктов	30	20	17	10	29

* – доза полученная на следе конкретного взрыва.

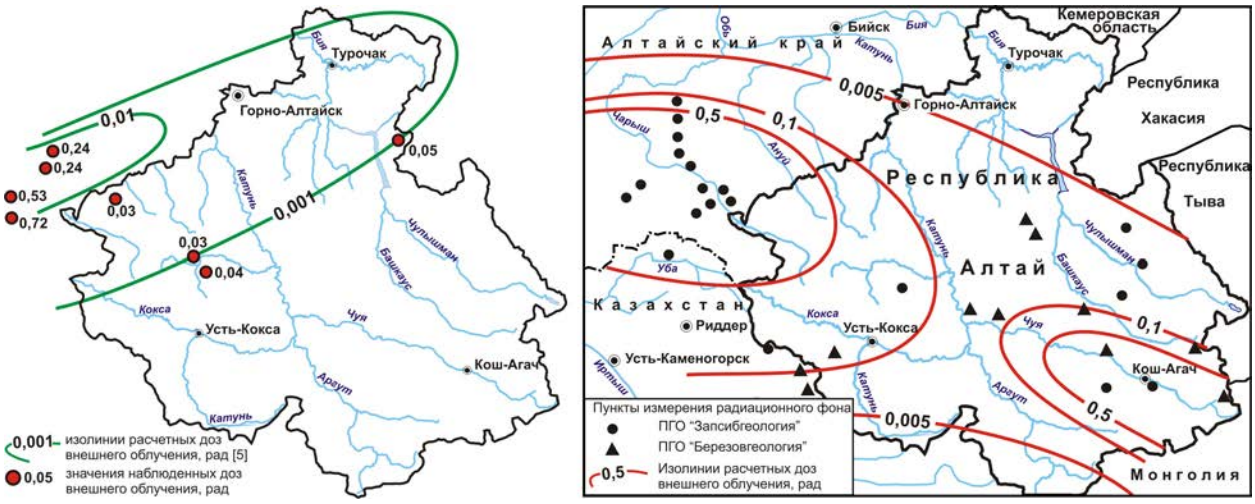


Рис. 3. Расчетные и фактические дозы внешнего облучения от ядерного взрыва 29.05.1955 (слева), реконструкция доз внешнего облучения от взрыва 12.08.1953 (справа)

взрывов, в том числе взрыва 29.05.1955 г. (рис. 2), на порядок выше доз, полученные математическим моделированием.

Современная радиологическая обстановка на территории региона. Считается, что в настоящее время, несмотря на повсеместное присутствие следов прошлых ядерных взрывов, радиационно-гигиеническая обстановка на территории РА является в целом условно благоприятной для проживания населения [6]. Она более чем на 95 % определяется естественными источниками ионизирующего излучения – природным гамма-фоном горных пород и почв, воздействием космического излучения, но в основном активностью радона и продуктов его распада. Воздействие же на обстановку глобальных и локальных выпадений долгоживущих ТРН играет незначительную роль.

Вышеотмеченное присутствие следов прошлых ядерных взрывов на территории РА проявлено не только в эпизодическом (только службой Роспотребнадзора РА) выявлении высокого содержания ^{137}Cs (до 100 и более Бк/кг) в почвах, а также в сохранении его повышенных концентраций в грибах, мхах и растительных подстилках в локальных очагах прошлого загрязнения.

Примером локально проявленного остаточного радиоактивного загрязнения территории Усть-Коксинского района РА (на отслеженном службой СИП следе взрыва 24.08.1956 г.) служат данные лесопатологического мониторинга «ЦЗЛ Алтайского края» об имеющих место случаях превышения ПДК для содержания ^{90}Sr в древесине хвойных пород.

Вышеизложенные данные позволяют сделать следующие выводы.

1. Изученность рассматриваемой проблемы в Республике Алтай в целом недостаточна для достоверной оценки последствий прошлого радиоактивного загрязнения ее территории, особенно южной части региона, где проявлены последствия испытаний ядерных устройств на полигоне Лобнор.

2. Значения реконструированных доз внешнего облучения территории и населения РА позволяют отнести ее к регионам, подвергшимся радиационному воздействию вследствие ядерных испытаний на СИП (зона повышенного радиационного риска с дозой облучения 5–25 бэр за весь период испытаний).

3. Существует необходимость изучения загрязненности почвенного покрова РА альфа-излучающими «горячие частицы» ТРН (^{239,240}Pu, ^{241}Am). Также необходимо провести углубленную оценку наличия ТРН в пищевых и кормовых дикоросах, особенно в грибах, в лектехсырье и древесине в очагах наиболее интенсивного прошлого радиоактивного загрязнения территории региона.

Литература

1. Мешков Н. А., Жиляев Е. Г., Вальцева Е. А., Галин Л. Л. Экологические и медико-биологические последствия ядерных испытаний на территорию и население Республики Алтай / Под ред. А. Ф. Цыба и И. М. Чижа. – М.: Воентехиздат, 1999. – 144 с.
2. Мешков Н. А., Пузанов А. В., Иванов С. И., Вальцева Е. А., Робертус Ю. В. Радиоэкологические характеристики распределения долгоживущих продуктов ядерных взрывов на территории Алтайского края и Республики Алтай // Здоровье населения и среда обитания, 2006. – № 12 (165). – С. 50–55.
3. Рихванов Л. П., Архангельская Т. А., Робертус Ю. В. Оценка выпадения делящихся радионуклидов на территории республики Алтай методом осколочной радиографии годовых колец деревьев. // Тезисы II Международной научно-

практической конференции «Тяжелые металлы, радионуклиды и элементы биофилы в окружающей среде». – Семипалатинск: 2002. – С. 496–501.
4. Рихванов Л. П., Робертус Ю. В., Таловская А. В., Шатилов А. Ю. Предварительные данные о геохимических особенностях ледниковых образований (на примере ледника Большой Актру в Горном Алтае) // Матер. IV Межд. научн.-практ. конфер. «Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде». Том 1. – Семипалатинск: 2006. – С. 388–395.
5. Робертус Ю. В., Фатин В. И., Рылов О. Б., Шамов С. Л. Аномальные повышения радиационного фона на территории Алтайского края // Ядерные испытания, окружающая среда и здоровье населения Алтайского края. – Барнаул: 1993. – Т. 1. – Кн. 1. – С. 112–116.
6. Робертус Ю. В., Любимов Р. В., Кац В. Е., Обухов И. П. Радиоэкологическая ситуация на территории населенных пунктов Республики Алтай // Матер. III Межд. конф. «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». – Томск: STT, 2009. – С. 499–501.
7. Страховенко В. Д., Щербов Б. Л., Маликова И. Н., Восель Ю. С. Закономерности распределения радионуклидов и редкоземельных элементов в донных отложениях озер Сибири // Геология и геофизика, 2010. – Т. 51. – № 11. – С. 1501–1514.

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ АКТИНИДОВ И ^{137}Cs В ДВУХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВОДОЕМАХ ПО «МАЯК»

А. К. Рожкова[1,2], Н. В. Кузьменкова[1,2]

[1]Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, Россия, rozhkovaak@gmail.com, kouzmenkova@mail.ru
[2]Институт геохимии и аналитической химии имени В. И. Вернадского РАН
Москва, Россия,

ACTINIDES AND ^{137}Cs ASSOCIATION WITH BOTTOM SEDIMENT COMPONENTS FROM TWO MAYAK PRODUCTION ASSOCIATION INDUSTRIAL RESERVOIRS

A. K. Rozhkova[1,2], N. V. Kuzmenkova[1,2]

[1]Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia, rozhkovaak@gmail.com, kouzmenkova@mail.ru
[2]Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia

Actinide and ^{137}Cs association with bottom sediment components were investigated in two Mayak reservoirs (R-17 (decommissioned) and R-4 (still in use) with big differences in size, activity, and water regime). Sequential extraction indicated that the main ^{137}Cs accumulation mechanism is incorporation into the clay minerals. The maximum plutonium content was detected in the residual fraction (R-17) and equally distributed between residual and bound to organic matter fractions (R-4). The ^{241}Am is associated with carbonates (R-17) and with organic matter (R-4). The uniform distribution of uranium by fractions was determined. The radionuclides are becoming less environmentally available with time since deposition.

Введение

Производственное объединение «Маяк», расположенное в Челябинской области, было первым предприятием в СССР по производству оружейного плутония. В результате производственной деятельности в 1949–1956 гг. в реку Течу было сброшено свыше $1 \cdot 10^{17}$ Бк радиоактивных отходов. Для предотвращения дальнейшего распространения депонированных в реке радиоактивных веществ в 1956–1964 гг. верховье реки Течи было перекрыто каскадом плотин, в результате чего образовался Теченский каскад водоёмов (ТКВ). В настоящее время важным вопросом является безопасность промышленной эксплуатации ТКВ при текущих уровнях радиоактивного загрязнения [1, 2].

Исследуемые водоёмы В-4 и В-17 являются уникальными по количеству и составу радионуклидов. Сброс жидких радиоактивных отходов в «Старое Болото» (водоём В-17) осуществлялся с 1949 года; водоем используется в качестве хранилища среднеактивных отходов; расположен в естественной низине, не является проточным. В настоящее время водоем-хранилище ЖРО В-17 выведен из эксплуатации.

Водоем В-4 является естественным, вместе с водоемами В-3, В-10 и В-11 образуют Теченскийкаскад водоемов. Водоемы В-3 и В-4 (Метлинский пруд) существовали до образования ПО «Маяк». В настоящее время водоем используется как хранилище низкоактивных радиоактивных отходов. Сброс отходов происходил с 1972 года, до этого водоем пополнялся за счет естественного перелива жидких радиоактивных отходов из водоема В-3.

Донные осадки играют роль «геохимического барьера» в процессах миграции радионуклидов. Подвижность/доступность радионуклидов в донных осадках зависит от механизмов прочности связи и поглощения, которые определяются химическими свойствами радионуклидов, состоянием и формами их присутствия в осадках, физико-химическими особенностями донных осадков и их сложным особым минералогическим и химическим составом.

Использование последовательного выщелачивания дает подробную информацию о биологической и физико-химической доступности и вероятности мобилизации металлов. Один из наиболее широко применяемых методов был предложен более 30 лет назад Тессиером [3]. Он разбил элементы на пять функционально определенных геохимических фракций, которые включают: обменную, карбонатную (кислото-растворимую), железо-марганцевые оксиды (восстанавливаемую), связанную с органическими веществами (окисляемую) и нерастворимую. Метод был разработан для определения тяжелых металлов в почвах, он позволяет определять металлы в следовых количествах и является универсальным для различных типов почв/донных осадков и радионуклидов.

Результаты последовательного выщелачивания зависят от выщелачивающих реагентов, времени контакта образца и раствора, интенсивности перемешивания, объемного отношения реагента к образцу и особенностей строения исследуемого донного осадка [4]. Определение параметров выщелачивания радионуклидов из твердых техногенных илов водоема позволит оценить фиксацию радионуклидов в донных осадках; отследить процесс их миграции в водоеме; оценить возможность дезактивации осадков и определить вероятность переноса между абиотической и биотической средой. Целью работы является определение форм нахождения актинидов и ^{137}Cs, а также возможных механизмов сорбции радионуклидов на донных осадках двух разных составов донных осадков и природы водоемов: В-17 и В-4.

Материалы и методы

Два образца донных осадков водоемов В-17 и В-4 ПО «Маяк» были проанализированы. Пробы отбирали на штатных станциях отбора проб для биологического мониторинга специальных промышленных водоемов ПО «Маяк» [5].

Водоем В-17 является небольшим, площадь поверхности водного зеркала составляет 0,13 км^2, объём воды 0,36 млн м^3. Максимальная глубина 6,5 м, средняя – 2,8 м. Солевой состав водоема В-17 [1]: $NaNO_3$ – 17,14 г/л; $NaHCO_3$ – 0,52 г/л; Na_2SO_4 – 0,71 г/л; NaCl – 0,29 г/л. Водоем В-4 в 10 раз больше – площадь водного зеркала составляет 1,3 км^2, объем воды 3,8 млн м^3, максимальная глубина – 3,5 м. Водоем В-4 характеризуется следующим солевым составом: NO^{3-} – 0,06 мг/л; Cl^- – 42 мг/л, SO_2^{2-} – 46 мг/л, Na^+ – 54 мг/л, K^+ – 4,8 мг/л, Mg^{2+} – 26,6 мг/л, Ca^{2+} – 36,1 мг/л. Вода в В-4 обменивается полностью в течение года за счет естественного перелива в водоем В-10 [6,7].

Все образцы были высушены на воздухе, из донных осадков были удалены камни и крупные органические части (корни, листья и т. д.). Затем образцы высушивали при 80 °С и гомогенизировали. Масса для анализа была небольшой – 0,05–0,1 г, так как удельная активность донных осадков очень высокая. Для контроля химического выхода были использованы изотопы ^{236}Pu (0,3 Бк/пробу) и ^{232}U (2,8 Бк/пробу).

Изучение форм нахождения радионуклидов в донных осадках проводили по методу Tessier [3]. Соблюдали соотношение «осадок : раствор» = 1 : 20 по массе. Обменная фракция была получена путем перемешивания смеси 0,05 г донного осадка и 1 мл 1 М раствора $MgCl_2$ (pH 7,5) при комнатной температуре в течение 1 часа. Фракцию, связанную с карбонатами, получали путем перемешивания смеси остатка с предыдущей фракции и 1 мл 1 М раствора NaAc, доведенного до pH 4,7 ледяной CH_3COOH при комнатной температуре в течение 3,5 часов. Фракция, связанная с железо-марганцовыми оксидами: осадок, полученный на предыдущей фракции, был экстрагирован 0,04 М раствором $NH_2OH \bullet HCl$ (до значения pH 2,1 доводили 25 % HOAc) при 96 °С в течение 6 часов. Фракция, связанная с органическим веществом, была получена путем смешения осадка с предыдущей стадии и 2 мл 30 % H_2O_2 (до значения pH 1,8 раствор перекиси водорода был доведен 0,02 М раствором HNO_3), выдержанного при 85 °С в течение 2 часов. Осадок, полученный на предыдущем этапе, экстрагировался последующим добавлением 2 мл 30 % H_2O_2 (pH 1,8) при 85 °С в течение 3 часов. В данной фракции использовали соотношение «осадок : раствор» = 1 : 40, так как перекись водорода – сильный окислитель и при нагревании разлагается – 1 мл недостаточно для выщелачивания. Нерастворимая фракция: осадки с предыдущей стадии были полностью растворены в смеси концентрированных кислот $HF–HNO_3–HCl$.

Цезий-137 и америций-241 были детектированы с помощью гамма-спектрометра GC 3818 HPGe CANBERRA с германиевым полупроводниковым детектором.Выделение изотопов плутония проводили с использованием ионообменной смолы – анионита АВ-17х8 (размер зерен 0,315–1,25 мм). Полученные растворы после последовательного выщелачивания были выпарены и растворены в 7,5 М растворе HNO_3.

Для стабилизации изотопов плутония в IV-валентном состоянии, к целевому раствору добавляли кристаллический $NaNO_2$, раствор нагревали в течение 5 минут при температуре 150 °C и выдерживали до прекращения выделения бурых паров. Через колонку с предварительно подготовленной смолой пропускался полученный раствор, затем последовательно колонку промывали 7,5 М HNO_3, 9 М HCl, 7,5 М HNO_3 и дистиллированной водой. Изотопы плутония выделяли, смывая с анионита нагретым до 40 °C 0,4 М раствором соляно-кислого гидроксиламина, затем из полученного раствора осаждали с фторидами церия.

Изотопы урана были выделены с помощью экстракционно-хроматографической смолы TRUResin (TrisKem) по стандартной методике (EichromTechnologies, Inc. ACW17 VBS). Полученные растворы после последовательного выщелачивания были выпарены и растворены в 3 М растворе HNO_3. Подготовка счетных образцов урана и плутония состояла в соосаждении радионуклидов с CeF_3 на Resolve фильтрах. Анализ содержания проводили с помощью α-спектрометра «ORTECAlfa-Esemble-2» с вакуумной камерой, детектором α-излучения (кремниевый детектор ENS-U900 (UL-TRA-AS)) и анализатором импульсов.

В экспериментальных данных отклонения от полученных результатов в основном связаны со случайными погрешностями (систематические погрешности сведены к минимуму): статистикой счета (0,03–5,5 %), эффективностью детектирования (2,5–3,6 %), приборной погрешностью весов (0,01 %), коэффициентом самопоглощения (1,7–2,6 %) и случайной неопределенностью измерения – среднее квадратическое отклонение и относительная статистическая неопределенность результатов (0,03–7,7 %), что составляет не более 8 % от полученных результатов.

Для расчета процента выщелачивания исходную активность изотопов плутония и урана брали относительно общей активности для исследуемого осадка, изученную ранее [7]: для водоема В-17 содержание $^{239,240}Pu$ 4,50 • 10^3 Бк/г, ^{238}Pu 6,21 • 10^2 Бк/г, ^{234}U 4,2 • 10^3 Бк/г, ^{238}U 1,6 • 10^1 Бк/г; для водоема В-4 – $^{239,240}Pu$ 5,3 • 10^0 Бк/г, ^{238}Pu 5,6 • 10^0 Бк/г, ^{234}U 3,7 • 10^0 Бк/г, ^{238}U 2,4 • 10^0 Бк/г.

Результаты и их обсуждение

Первые три фракции – водорастворимая, обменная и карбонатная по физико-химическим характеристикам являются наиболее подвижными и биологически доступными, поэтому содержание радионуклидов в этих фракциях представляет наибольший интерес для оценки опасности загрязнения донных осадков и миграции радионуклидов гидробионтами водоема.Предварительный эксперимент по десорбции радионуклидов показал, что содержание ^{137}Cs в водорастворимой фракции менее одного процента от общей активности осадка; α-излучающие радионуклиды не были обнаружены. Результаты эксперимента (рисунок 1) показали наибольшее содержание ^{137}Cs (до 95 %) в нерастворимом остатке, что может свидетельствовать о возможности встраивания атомов цезия в структуру глинистых минералов, разрушение которых достигается действием сильных кислот.

Процентное распределение последовательного выщелачивания цезия и америция из донных осадков двух водоемов показало отличие во фракциях, связанных с карбонатамии органическим веществом, что может быть объяснено разным составом донных осадков. Из литературы [8] известно, что донные отложения водоема В-17 на 90 % состоят из неорганических веществ, на 9 % из органических остатков с разрушенной структурой и на 1 % из органических остатков с сохранившейся структурой. Видовое разнообразие водоема В-4 заметно богаче водоема В-17 [9], что является причиной большого количества америция во фракции, связанной с органическим веществом.

Поведение плутония в окружающей среде и изменение его форм может быть результатом одновременно нескольких происходящих процессов, например, сорбция в сочетании с реакциями восстановления на границе вода-минеральная часть или в растворе за счет реакции осаждения [10]. Плутоний в образцах окружающей среды плохо растворим [11]. Для плутония максимальное содержание в нерастворимом остатке водоема В-17 может быть объяснено явлением старения осадков, так как сброс отходов в водоем осуществлялся с 1949 года.Все формы плутония в донных осадках водоема В-4, полученные в этой работе, коррелируют с литературными данными. Распределение во фракции, связанной с органическим веществом и нерастворимом остатке такое же, как в донных осадках водоема «Асановское болото» и реки Теча (Муслюмовский район); и отсутствие в обменной фракции также коррелирует с результатами в донных осадках реки Енисей (Красноярский край) [12, 13].

Изотопы урана при последовательном выщелачивании из донных осадков двух водоемов были обнаружены во всех фракциях. Для водоема В-17 максимальное значение достигается во фракции, связанной с карбонатами; для В-4 – в нерастворимом остатке. В водоемах ПО «Маяк» из-за значительного содержания изотопов урана в легко- и среднедоступных, а также достаточно подвижных фракциях можно предположить, что уран вымывается из донных осадков поверхностными водами. Это также возможно ввиду подвижности соединений урана в окружающей среде. Возможными механизмами миграции урана будут образование высоко подвижных уранилкарбонатных минералов, а также образование

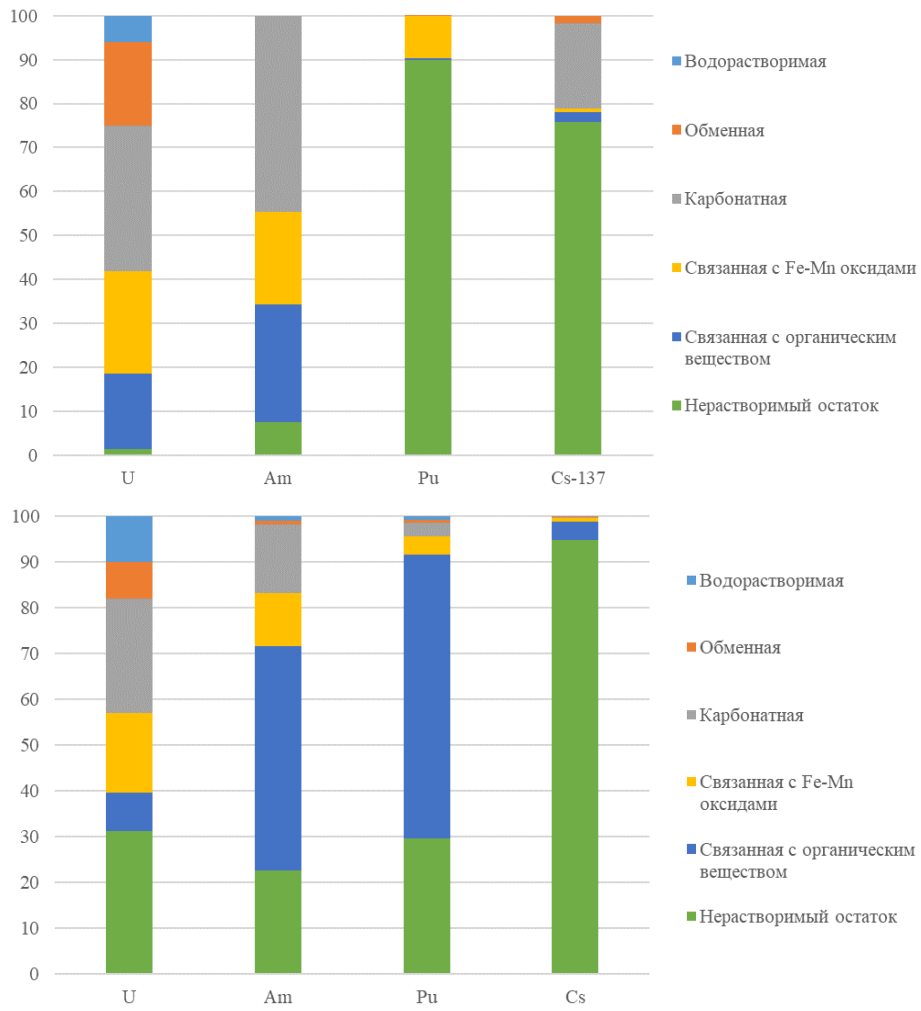


Рис. 1. Процентное распределение ^{137}Cs и актинидов во фракциях донных осадков водоемов (а) В-17 и (б) В-4

адсорбированных частиц на поверхности оксидов железа и марганца, что дает возможность предположить ионный транспорт карбонатных комплексов.

Заключение

Определены формы нахождения ^{137}Cs, ^{241}Am, ^{238,239,240}Pu и ^{234,238}U. Детальные сведения о формах нахождения исследуемых радионуклидов показал эксперимент последовательного выщелачивания по методу Tessier. Цезий очень тяжело перевести в растворимую форму. Это возможно лишь только под действием сильных кислот-окислителей – большая часть ^{137}Cs обнаружена в нерастворимом остатке (до 95 %), это может указывать на основной механизм сорбции в донные осадки – встраивание в структуру глинистых минералов. В донных осадках сорбция ^{241}Am идет по механизму комплексообразования преимущественно с карбонатами (для донных осадков водоема В-17); органическим веществом (для донных осадков водоема В-4) и железо-марганцевыми оксидами в меньшей степени. Исследование плутония показало одинаковое поведение различных изотопов, максимальное содержание в нерастворимой фракции (90 %) донных отложений водоема В-17 возможно связано с явлением старения осадков; в водоеме В-4 основная форма плутония представлена в связанном с органическим веществом (62 %) и нерастворимой (30 %). Изотопы урана были обнаружены во всех фракциях двух исследуемых водоемов. Основное содержание урана для водоема 17 во фракции, связанной с Fe–Mn оксидами (23 %) и карбонатной (33 %), для водоема 4 – в нерастворимом остатке (31 %) и карбонатной (25 %), что может указывать на ионный транспорт карбонатных комплексов.

Результаты последовательного выщелачивания всегда зависят от многих факторов и могут быть интерпретированы по-разному, однако нахождение плутония и цезия в физико-химически неподвижных фракциях указывает на их низкую биологическую доступность и низкую вероятность десорбции при изменении химического состава воды. А нахождение америция и урана в умеренно подвижных фракциях указывает на возможность миграции радионуклидов в биотические составляющие системы водоемов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-73-20051).

Авторы выражают благодарность и глубокую признательность Пряхину Е. А. (ФГБУН «Уральский

научно-практический центр радиационной медицины») и Мокрову Ю. Г. (ПО «Маяк») за оказанную помощь при проведении данного исследования.

Литература

1. Стукалов П. М. Промышленный водоем ПО «Маяк» Старое Болото. Общая характеристика и история эксплуатации. // Вопросы радиационной безопасности, 2000. – № 1. – С. 50–60.
2. Андреев С. С., Попова И. Я., Пряхин Е. А. Радиоактивное загрязнение некоторых водоемов – хранилищ жидких радиоактивных отходов ПО «Маяк». // Вестник Челябинского государственного университета, 2013. – № 7. – С. 85–87.
3. Tessier A., Campbell P. G. C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. // Analytical Chemistry, 1979. – V. 51. – P. 844–851.
4. Федотов П. С., Спиваков Б. Я. Статические и динамические методы фракционирования форм элементов в почвах, илах и донных отложениях. // Успехи химии, 2008. – Т. 77. – С. 690–703.
5. Осипов Д. И. и др. Планктонные сообщества озера Карачай // Вопросы радиационной безопасности, 2011. – № S. – С. 50–59.
6. Кузьменкова Н. В., Власова И. Э., Рожкова А. К. и др. Распределение радионуклидов между биотическими и абиотическими компонентами радиоактивно-загрязненных водоемов В-17 и В-4. // Вопросы радиационной безопасности, 2017. – № 1. – С. 54–66.
7. Слюнчев О. М., Козлов П. В., Солдатов Б. В. и др. Обоснование перспективных технических решений по очистке воды Теченского каскада водоёмов // Вопросы радиационной безопасности, 2007. – № 2. – С. 14–26.
8. Стукалов П. М., Симкина Н. А. Изучение параметров десорбции радионуклидов из донных отложений водоема Старое Болото. Обзор экспериментальных исследований. // Вопросы радиационной безопасности, 2008. – № 2. – С. 44–60.
9. Pryakhin E. A. Mokrov Yu. G., Tryapitsina GA et al. Characterization of biocenoses in the storage reservoirs of liquid radioactive wastes of Mayak PA. Initial descriptive report // J. of Environmental Radioactivity, 2016. – Т. 151. – С. 449–460.
10. Duff M. C. Speciation and transformations of sorbed Pu on geologic materials: wet chemical and spectroscopic observations. // Elsevier: Radioactivity in the Environment, 2001. – V. 1. – P. 139–157.
11. Rai D., Serne R. J., Swanson J. L. Solution Species of Plutonium in the Environment. // Journal of Environmental Quality, 1980. – V. 9. – P. 417–420.
12. Skipperud L., Oughton D., Salbu B. The impact of Pu speciation on distribution coefficients in Mayak soil. // Science of the total environment, 2000. – V. 257. – P. 81–93.
13. Skipperud L., Brown J., Fifield L. K., Oughton D. H., Salbu B. Association of plutonium with sediments from the Ob and Yenisey Rivers and Estuaries. // Journal of environmental radioactivity, 2009. – V. 100. – P. 290–300.

U И Th В ОТХОДАХ ОБОГАЩЕНИЯ СУЛЬФИДНЫХ РУД КОМСОМОЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА

Б. Ю. Сарыг-оол, И. Н. Мягкая, Е. В. Лазарева

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН
Новосибирск, Россия, sarygool@igm.nsc.ru

U AND Th IN THE SULFIDE TAILINGS OF KOMSOMOLSK GOLD DEPOSIT

B. Yu. Saryg-ool, I. N. Myagkaya, E. V. Lazareva

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
Novosibirsk, Russia, sarygool@igm.nsc.ru

The paper presents data on the total content of U and Th in the sulfide tailings of Komsomolsk gold deposit. The composition of the tailings' pore solutions was studied, U and Th contents were also determined. It was found that there is a redistribution of U in the tailings with sorption on secondary Fe (III) minerals and natural organic matter, and favorable conditions are created for increased migration of U and Th.

Введение

Хвостохранилища отходов обогащения сульфидных руд являются источниками загрязнения окружающей среды потенциально токсичными элементами (ПТЭ) [1]. При этом основное внимание исследователей обращено на изучение профилирующих для сульфидных хвостохранилищ ПТЭ, таких как: Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, Sb, Hg, Pb. Другие ПТЭ (РЗЭ, актиноиды, U, Th и др.) изучаются редко ввиду относительно малых содержаний, меньшей биологической доступности и неустановленной химической токсичности для живых организмов.

Известно, что уран является высокомобильным элементов в окислительной обстановке в гипергенных условиях с низкой биологической доступностью, а торий – крайне маломобильным, биологическая доступность которого плохо изучена [2]. Однако, зачастую в хвостохранилищах формируются условия, которые не только увеличивают миграционную способность элемента, но и его биодоступность. Так, установлено, что при pH 2–3 (например, в кислых дренажных растворах, формирующихся в результате окисления сульфидсодержащих отходов [1]) увеличивается доля истинно растворенных форм U (в виде UO_2^{2+}) и Th (в виде Th^{4+} и $ThSO_4^{2+}$) [2]. Увеличение содержания растворенного органического вещества в поровых растворах способствует образованию устойчивых в растворе коллоидов с U и Th, препятствующие их сорбции на различные минералы [2, 3]. Активное накопление U и Th наземными и водными растениями из техногенных почв и вод с высокими содержаниями элементов продемонстрированы множеством экспериментальных работ [4].

Таким образом, выявление геохимических факторов, повышающих подвижность и биодоступность U и Th, является актуальной задачей. Цель настоящей работы – определение валовых содержаний Th и U в отходах обогащения сульфидных руд Комсомольского месторождения золота, а также изучение геохимических свойств поровых вод (pH–Eh, Corг, минерализация, содержания U, Th) соответствующих отходов.

Объект исследования

Комсомольское месторождение и одноименное хвостохранилище расположены в пос. Комсомольск, Кемеровская область, Россия (координаты 55°38'07,3" СШ, 88°11'53,6" ВД). Месторождение относится к кварц-золото-сульфидному типу, в его рамках известно более 150 золото-сульфидно-кварцевых жил. Рудные жилы сложены кварцем (90–91 %) с незначительным количеством кальцита, анкерита, барита, сульфидами (3–10 %): пиритом, пирротином, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, арсенопиритом, реже – шеелитом, киноварью и др. минералами. В рудах присутствуют ряд потенциально токсичных элементов, включая U (1,8 г/т) и Th (9,0 г/т) [1, 5].

Хвостохранилище представляет собой естественную котловину, с восточной и южной сторон оно ограждено рельефом лога, с западной и северной – насыпной дамбой. Отходы складировались без какой-либо предварительной обработки днища лога, т. е. вмещающим субстратом техногенного тела являются четвертичные отложения: почвы с остатками растительности, суглинки и элювий [1, 5].

В хвостохранилище складированы непосредственно отходы цианирования руд Комсомольского месторождения золота, а также штейны осадительной плавки сурьмяного концентрата Кадамжайского комбината (Кыргызстан), с 2004 г. в южной части складировались высокомышьяковистые сульфидные отходы цианирования Берикульского месторождения [1, 5].

Твердое вещество отходов состоит главным образом из жильных (кварц, полевой шпат, кальцит) и сульфидных минералов (пирит, сфалерит, галенит, пирротин, арсенопирит). Материал отходов содер-

жит широкий спектр потенциально токсичных элементов (Sb, As, Pb, Zn, Cu и Cd). В хвостохранилище наблюдается ярко выраженное гранулометрическое и гравитационное фракционирование вещества, что характерно для заливных хвостохранилищ. Условия эксплуатации хвостохранилища привели к образованию в толще отходов линз гравитационного обогащения [5].

В результате складирования отходов над поверхностью твердой части образовался техногенный пруд (гидроотвал), который на данный момент пополняется за счёт естественных природных стоков и атмосферных осадков. Согласно последним опубликованным данным воды гидроотвала нейтральные-слабощелочные (pH 7,39–8,23), Eh 360–490 мВ, слабоминерализованные (минерализация 440 мг/л), Ca–SO_4 типа с относительно высокими содержаниями As (0,21 мг/л) и Sb (0,59 мг/л) [6].

Методы исследования

Отбор проб

Летом 2016 года было проведено опробование твердого вещества Комсомольского хвостохранилища в северной части, где складированы отходы переработки руд Комсомольского месторождения и Кадамжайских штейнов [5]. Для этого недалеко от дамбы был отобран вертикальный разрез глубиной около 130 см (рис. 1). Место шурфа выбрано таким образом, чтобы вскрыть подстилающую отходы захороненную почву. Верхняя часть отходов в месте отбора уже начала зарастать. Таким образом, верхний и нижний горизонты разреза содержали органическое вещество: формирующуюся почву и захороненную почву с детритом растений, соответственно. Опробование производилось послойно с учетом видимой зональности вещества.

Из отобранного вещества на месте отжимались поровые растворы ручным мобильным прессом под давлением 150 г/см^3. Также была отобрана вода из гидроотвала. В полевых условиях в водах измерялись pH и Eh. В лабораторных условиях отжатое твердое вещество высушивалось на воздухе, гомогенизировалось, истиралось на виброистирателе, и анализировалось.

Методы анализа

Определение pH и Eh проводилось потенциометрическим методом, используя анализатор портативной серии – «Анион 7051» («Инфраспак-Аналит», Россия). Определение содержания общего и растворенного органического углерода проводилось на анализаторе Multi N/C 2100S («Analytik Jena AG», Германия). Содержания элементов (катионы, U, Th) в водных пробах были проанализированы методом ИСП-МС на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce («Agilent Technologies», США) в ЦКП «Ультрамикроанализ» на базе Лимнологического института СО РАН, г. Иркутск. Анионный состав (F^-, Cl^-, Br^-, NO_3^-, SO_4^{2-}) исследован методом ионной хроматографии на приборе 883 Basic IC plus («Metrohm», Швейцария). Валовые содержания U и Th были определены методом инструментального нейтронно-активационного анализа на базе Томского политехнического университета.

Результаты и их обсуждение

В разрезе выделяется шесть основных горизонтов (рис. 1) и преобладает вещество отходов (горизонты 2–15), которое сверху (горизонт 1) покрыто небольшим слоем новообразованной почвы, смешанной с веществом отходов. Подстилаются отходы почвой с остатками растительного детритового вещества (горизонты 16–17) [5]. В разрезе выделяется крупный горизонт (5–9), для которого характерно присутствие линз гравитационного обогащения. В состав этих линз входят рудные минералы, такие как пирит, магнетит, ильменит, пирротин, арсенопирит, халькопирит и галенит [5]. Формирование этих структур связано с таким явлением как гранулометрическое и гравитационное фракционирование, характерное для заливных хвостохранилищ [7].

Валовые содержания U в пределах разреза варьируют в широком диапазоне от 0,25 до 6,0 г/т (рис. 1). Среднее содержание элемента по разрезу (2,1 г/т) соответствует содержаниям в рудах Комсомольского месторождения (1,8 г/т) [1]. При этом горизонты, сложенные преимущественно илистым веществом отходов, характеризуются минимальными содержаниями U (горизонты 5, 12–16). Высокие содержания наблюдаются в горизонтах, где преобладает песчаное вещество отходов с линзами гравитационного обогащения (горизонты 1–4, 6–11), и в подстилающей почве (горизонт 17). Подобное распределение может свидетельствовать о том, что основные формы нахождения U в веществе отходов связаны с минералами тяжелой фракции [5]. Кроме того, не исключено, что U сорбируется вторичными минералами Fe (III) (оксиды и гидроксиды) [10], которые широко распространены в веществе отходов, образуются в тесном контакте с сульфидами и встречаются на глубине до 75 см [5]. Накопление урана на геохимических барьерах может быть связано не только с наличием сильных минеральных редуктантов, таких как Fe низкой окисленности, но также с деятельностью металл-редуцирующих бактерий [10]. Повышенные содержания урана в горизонтах, содержащих почву (горизонты 1, 17) и растительные остатки (горизонты 2–4), вероятно обусловлены также сорбцией элемента органическим веществом и глинистыми минералами [11]. Содержания U в подстилающей почве (горизонт 17) согласуются с содержаниями в верхней континентальной коре [2], почвах юга Западной Сибири [8] и Кемеровской области [9].

Th распределен по разрезу относительно равномерно – от 1,4 до 3,7 г/т (рис. 1). Тем не менее, минимальные содержания наблюдаются в горизонтах, сложенных преимущественно илистым веществом (горизонты 5 и 16); общая картина его распределения схожа с U. Не исключено, что Th также связан с тяжелой фракцией и в процессе перераспределения сорбируется органическим веществом, вторичными минералами Fe (III) и т. д. [11]. Однако, из-за невысокой мобильности в гипергенных условиях [2], торий перераспределяется по разрезу менее контрастно, чем уран. Содержания Th в разрезе гораздо ниже кларков почв и биосферы [2], содержаний в верхней континентальной коре [2], в рудах Комсомольского месторождения [1], в почвах юга Западной Сибири [8] и Кемеровской области [9].

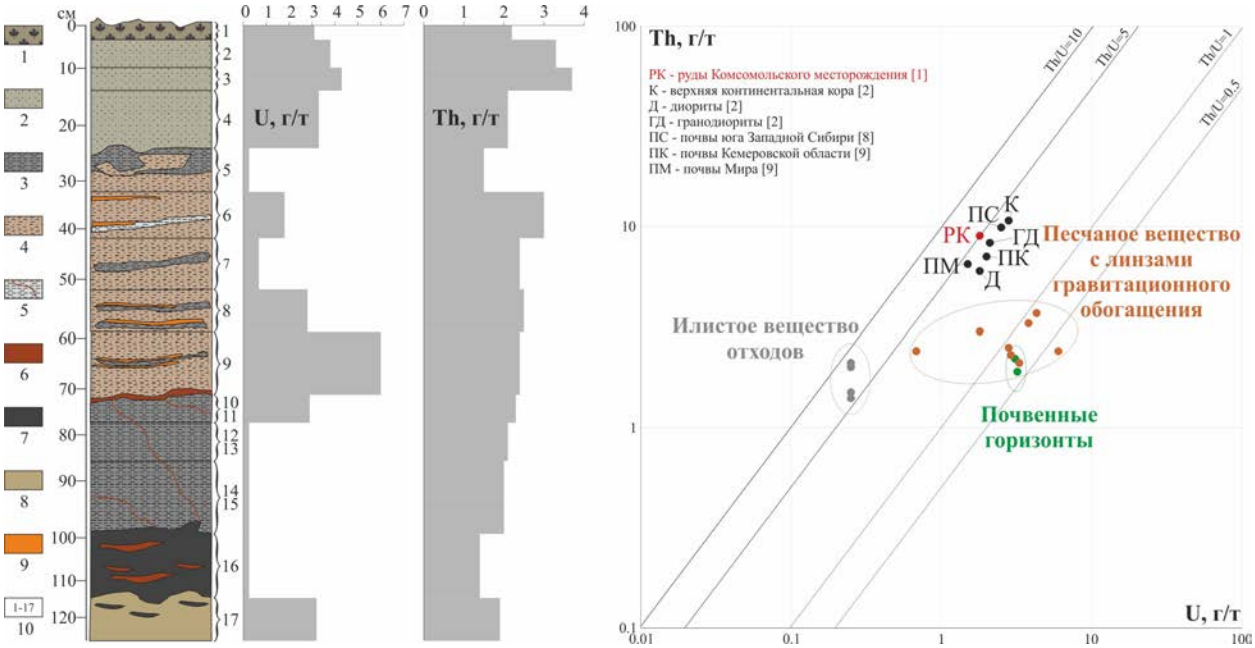


Рис. 1. Схема разреза из Комсомольского хвостохранилища, валовые содержания U и Th в разрезе (серые гистограммы), Th/U отношение на фоне литературных данных (см. список литературы)

1 – почва, поросшая травой и мхом с песчаной фракцией отходов; 2 – песчаное вещество отходов с небольшим количеством корешков и растительных остатков; 3 – илистое вещество отходов; 4 – слоистое песчано-илистое вещество отходов с линзами илистого вещества; 5 – илистое вещество отходов с мельчайшими прослоями гидроксидов Fe (III); 6 – прослои гидроксидов Fe (III); 7 – органосодержащее вещество с крупными растительными остатками, небольшим количеством отходов и линзами гидроксидов Fe (III); 8 – почва с растительными останками и вкраплениями вышележащего слоя; 9 – линзы гравитационного обогащения; 10 – выделенные горизонты, более дробно.

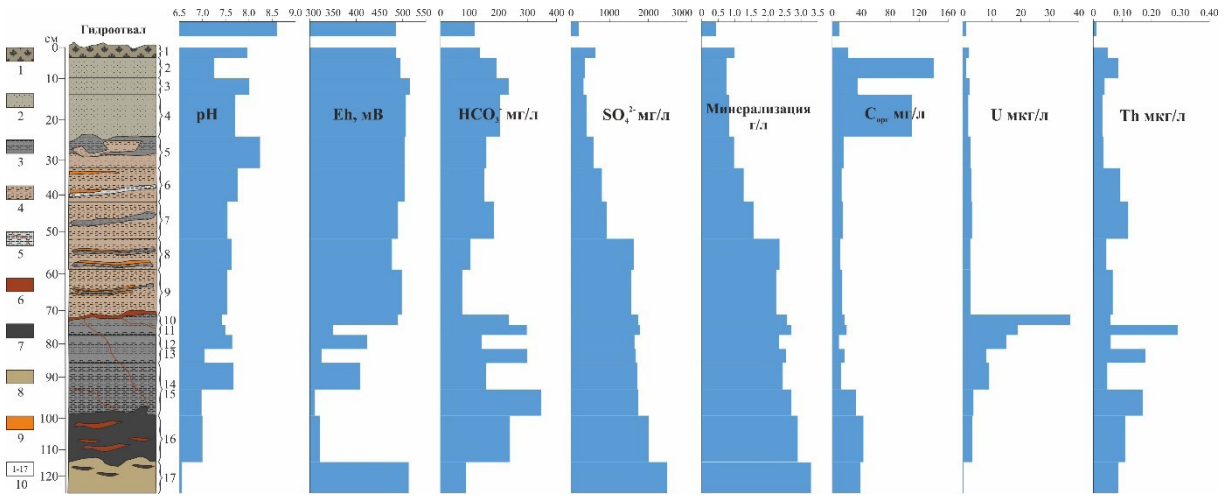


Рис. 2. Геохимические показатели поровых растворов отходов и вод гидроотвала Комсомольского хвостохранилища

Примечание: (см. описание рис. 1)

По Th/U отношению вещество отходов (0,6–8,4) отличается от руд Комсомольского месторождения (5,0) и вмещающих пород (3,3–3,9): отходы существенно обеднены Th, а U распределен по разрезу крайне неравномерно (рис. 1). Илистое вещество отходов характеризуется высоким Th/U отношением (5,6–8,4), почвенные горизонты – низким (0,6–0,7), песчаное вещество с линзами гравитационного обогащения – также низким, за исключением горизонтов с крайне неоднородным составом (0,6–3,5). Th/U отношение для почв юга Западной Сибири (3,96), Кемеровской области (3,55), Мира (4,33) выше, чем в почвенных горизонтах, контактирующих или захороненных под отходами Комсомольского хвостохранилища (0,6–0,7; рис. 1). Пониженное Th/U отношение в горизонтах свидетельствуют о техногенно-измененных почвах, так как для почв вне зон техногенного воздействия характерно Th/U отношение близко к 3,0–4,5, а почвы, подверженные техногенным изменениям, имеют более низкое Th/U отношение [8, 9].

Согласно геохимической классификации, вода в гидроотвале – холодная, кислородсодержащая (O_2 7,5 мг/л), сильнощелочная (pH 8,6), с окислительной обстановкой (Eh +485 мВ), пресная (минерализация 0,44 г/л), Ca–SO_4 типа. Поровые растворы отходов можно отнести к холодным, нейтральным/слабощелочным водам (pH 6,6–8,2), с окислительной обстановкой (Eh +310 – +515 мВ), минерализация варьирует от пресных до соленых (0,75–3,3 г/л), Mg–Ca–SO_4 типа (рис. 2).

Валовые содержания U в поровых растворах отходов не превышают 5 мкг/л, за исключением горизонтов илистого вещества отходов (горизонты 10–14), где содержания достигают 8–37 мкг/л (рис. 2). В этих горизонтах наблюдается увеличение минерализации. Известно, что уран в гипергенных условиях мигрирует в виде уранил-иона UO_2^{2+} и его гидроксо-, карбонатных и сульфатных комплексов [2]. На основании данных по геохимическому составу поровых растворов предполагается, что в окислительных условиях Комсомольского хвостохранилища U в поровых растворах находится в виде этих комплексах.

Средние минимальные содержания Th в поровых растворах находятся на уровне 0,05 мкг/л, однако по разрезу выделяются несколько горизонтов с повышенными содержаниями элемента (рис. 2). Пики содержаний тория совпадают со снижением pH–Eh условий поровых вод. Возможно, что колебания этих условий спровоцировали обогащение поровых вод. Преобладание сульфатов и гидрокарбонатов в поровых водах над другими анионами позволяет полагать, что Th мигрирует в виде комплексов с гидроксильными, сульфатными и карбонатными лигандами [2, 12].

Необходимо отметить, что в данном исследовании поровые растворы изучались без разделения взвешенной и коллоидной форм элементов от истинно растворенных. Существенный вклад в миграцию U и Th в природных водах и поровых растворах почв вносят формы, ассоциированные с коллоидами и взвесью [2, 10–14], причем для тория взвешенные и коллоидные формы являются доминирующими в грунтовых водах и поровых растворах почв [11–14] из-за невысокой растворимости минералов Th [13]. В хвостохранилище складываются благоприятные условия для повышенной миграции элементов во взвешенной и коллоидной формах. Во-первых, в ходе процессов вторичного минералообразования образуются коллоиды и взвесь с соосажденными поллютантами [5], способные переноситься поровыми растворами. Во-вторых, песчаное вещество (на глубине до 75 см) обладает высокой проницаемостью для движущихся вод [7], поэтому в разрезе наблюдается преимущественно вертикальное движение поровых растворов и поступающих поверхностных вод [6]. В-третьих, образование почвенного слоя и естественная ревегетация увеличивает содержание органического вещества как в минеральном осадке, так и в поровых растворах, что увеличивает подвижность Th и U [3].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН им В. С. Соболева.

Литература

1. Рихванов Л. П. Биогеохимический мониторинг в районах хвостохранилищ горнодобывающих предприятий с учетом микробиологических факторов трансформации минеральных компонентов / Рихванов Л. П., Абросимова Н. А., Барановская Н. В., Большунова Т. С., Горбатюк Е. А., Еделев А. В., Межибор А. М., Мягкая И. Н., Соктоев Б. Р., Юсупов Д. В., Белан Л. Н., Бортникова С. Б., Густайтис М. А., Жмодик С. М., Ищук Н. В., Кириченко И. С., Наркович Д. В., Лазарева Е. В., Оленченко В. В., Саева О. П., Сарыг-оол Б. Ю., Усманова Т. В., Юркевич Н. В. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 437 с.
2. Иванов В. В. Экологическая геохимия элементов: Справочник: В 6 кн./ Под ред. Э.К. Буренкова. – М.: Экология, 1997. – Кн. 6: Редкие f-элементы. – 607 с.: ил.
3. Li Z. Conditions affecting the release of thorium and uranium from the tailings of a niobium mine / Li Z., Hadioui M., Wilkinson K. J. // Environmental Pollution, 2019. – V. 247. – P. 206–215.
4. Sasmaz M. Bioaccumulation of uranium and thorium by Lemna minor and Lemna gibba in Pb–Zn–Ag tailing water / Sasmaz M., Obek E., Sasmaz A. // Bulletin of environmental contamination and toxicology, 2016 – V. 97. – № 6. – P. 832–837.

5. Лазарева Е. В. Поведение мышьяка и сурьмы в процессе гипергенного преобразования отходов цианирования золото-арсенопирит-кварцевых руд: дис. канд. геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2003. – 149 с.
6. Bortnikova S. Characterization of a gold extraction plant environment in assessing the hazardous nature of accumulated wastes (Kemerovo region, Russia) / Bortnikova S., Olenchenko V., Gaskova O., Yurkevich N., Abrosimova N., Shevko E., Edelev A., Korneeva T., Provornaya I., Eder L. // Applied Geochemistry, 2018. – V. 93. – P. 145–157.
7. Robertson W. D. The physical hydrogeology of mill-tailings impoundments / Robertson W. D., Blowes D. W., Jambor J. L. // The environmental geochemistry of sulfide mine wastes: Short course handbook. – Waterloo, Ontario, 1994. – V. 22. – P. 1–17.
8. Рихванов Л. П. Радиоактивные элементы в окружающей среде / Рихванов Л. П., Барановская Н. В., Волостнов А. В., Архангельская Т. А., Межибор А. М., Берчук В. В., Жорняк Л. В., Замятина Ю. Л., Иванов А. Ю., Таловская А. В., Шатилова С. С., Язиков Е. Г. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 128–136.
9. Malikova I. N. The effect of landscape factors on natural radioactivity of soils in Siberia / Malikova I. N., Strakhovenko V. D. // International Journal of Environmental Research, 2017. – V. 11. – № 5–6. – P. 653–665.
10. Водяницкий Ю. Н. Химические аспекты поведения урана в почвах (обзор литературы) / Водяницкий Ю. Н. // Почвоведение, 2011. – № 8. – С. 940–952.
11. Rachkova N. G. The state of natural radionuclides of uranium, radium, and thorium in soils / Rachkova N. G., Shuktomova I. I., Taskaev A. I. // Eurasian Soil Science, 2010. – V. 43. – № 6. – P. 651–658.
12. Langmuir D. The mobility of thorium in natural waters at low temperatures / Langmuir D., Herman J. S. // Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980. – V. 44. – № 11. – P. 1753–1766.
13. Basu H. Association and migration of uranium and thorium with silica colloidal particles in saturated subsurface zone / Basu H., Singhal R. K., Pimple M. V., Kumar A., Reddy A. V. R. // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2015. – V. 303. – № 3. – P. 2283–2290.
14. Harmsen K. Occurance and behaviour of uranium and thorium in soil and water / Harmsen K., De Haan F. A. M. // Netherlands journal of agricultural science, 1980. – V. 28. – № 1. – P. 40–62.

СОВРЕМЕННЫЕ НАКОПЛЕНИЯ УРАНА В ПОЧВЕННО-ТОРФЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВИТИМО-КАРЕНГСКОГО РАЙОНА (СЕВЕРНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

А. В. Сащенко, В. М. Тюленева

Всероссийский институт минерального сырья, ФГБУ «ВИМС»
Москва, Россия, sashchenko@vims-geo.ru, verat@inbox.ru

MODERN URANIUM ACCUMULATIONS IN SOIL-PEAT SEDIMENTS OF VITIMO-KARENGSKY DISTRICT (NORTHERN TRANSBAIKAL)

A. V. Sashchenko, V. M. Tyleneva

All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N. M. Fedorovsky
Moscow, Russia, sashchenko@vims-geo.ru, verat@inbox.ru

The mineralogical and geochemical features of ore concentrations and the conditions for the uranium accumulation in association with plant organic matter of the surface soil-peat sediments of the Vitimo-Karengsky district are considered. It is shown that the uranium-bearing sediments inherit the geochemical specificity of the basement granitoids. The general regularities in the formation of uranium mineralization in rocks enriched with organic matter in the ore occurrences of the Karengsky district are revealed.

Введение

Урановорудные объекты Витимо-Каренгского района (Сиротинка, Орогочи) относятся к группе так называемых «поверхностных» месторождений в торфяниках и могут представлять интерес как источники урановой руды. Процессынакопления урана в приповерхностных отложениях, содержащих органическое вещество,известны достаточно давно [1]. Урановосные торфяникиразвитыв различных климатических зонах земного шара, в разных физико-географиче-

ских ландшафтах, но в настоящее время нигде в мире такие объекты не разрабатываются. В Российской Федерации урановые месторождения «поверхностного» типа встречаются в гумидной климатической зоне, преобладающей на территории страны. Подобные объекты обычно характеризуются небольшими масштабами с компактным расположением рудных тел и залежейи незначительным ресурсным потенциалом 50–100 т урана. Они локализуются в рыхлых, обогащенных органическим веществомотложениях современных речных долин третьего-четвертого порядков. Рудные тела здесь образуют субгоризонтальные залежи лентообразной либо чашеобразной формы [3]. Руды характеризуются неустановившимся радиоактивным равновесиемс низким коэффициентом радиоактивного равновесия (КРР) Ra/U << 1. Такие значения КРР характерны для современных, практически безрадиевых накоплений урана, что затрудняет их выявление методами радиометрии. Рудопроявления Витимо-Каренгского района расположены в зоне многолетней мерзлоты, в отличие от других месторождений урана в торфяниках [2]. Благоприятными условиями для формирования оруденения этого типа являются потоки грунтовых вод, обогащенных ураном и наличие на путях транзита скоплений органического вещества, обеспечивающего аккумуляцию урана на сорбционно-восстановительных барьерах в виде ионно-сорбционной «пропитки», преимущественно в безминеральной форме. Это отличает их от эксплуатируемых гидрогенных «песчаниковых» месторождений Витимского урановорудного района, где рудная минерализация с течением времени эволюционирует от многокомпонентных урансодержащих гелей до мономинеральной формы [5].

На Каренгской площади наиболее крупным объектом с поверхностным оруденением в торфяно-почвенных отложениях является рудопроявление Орогочи, расположенное на левом берегу одноименной реки, врезанной в массив мезозойских гранитоидов. Рудопроявление приурочено к тектоническому узлу с очень активной гидродинамикой и развитием водных источников, обогащенных ураном. Самые высокие концентрации урана в грунтовых водах – $2 \cdot 10^{-3}$–$5 \cdot 10^{-5}$ г/л, что на два порядка выше, чем в остальной гидросети района [4]. Протяженность основной рудной залежи составляет около 1 км, при ширине от 350 до 750 м. Содержание урана 0,07–0,5 %, при среднем 0,1 % на мощность от 0,5 до 4 м. Богатое оруденение сосредоточено в основном в центральной части лентовидной залежи, приуроченной к притоку р. Орогочи. В целом,в оруденелых торфяно-почвенных образованиях более высокие концентрации урана (1–3 %) в отдельных пробахсвязаны с зонами,максимально обогащенными органическим веществом.

Типовой разрез рыхлых отложений рудопроявления имеет трехчленное строение. В нижней части – специализированные на уран крупнозернистые граниты орекитканского и амананского комплексовс повышенными содержаниями урана, тория, молибдена и редких элементов перекрываютсядезинтегрированной корой выветривания преимущественно каолинит-смектитового состава. Отложения обогащены акцессорными минералами – цирконом, монацитом, фторапатитом и др., концентрирующими редкие и радиоактивные элементы, которыеподчеркивают геохимическую специфику подстилающихгранитов. Содержание урана в образованиях коры выветривания достигает первых сотых процентов, при каротаже слой выделяется высокими значениями радиоактивности (до 200 мкР/час). Здесьотмечается локальныеповышения концентраций урана, относимые к погребенному типу оруденения, для которого характерносмещение радиоактивного равновесия в сторону радия – Ra/U здесь всегда больше единицы [4]. Выше, в средней частиразреза, залегают коллювиальные дресвяно-щебнистые отложения с песчано-глинистым цементом, преимущественно коричневато-серого цвета. Мощность пачки варьирует от первых сантиметров в бортовой частидо 2–3 метров в осевой части долин. Терригенная кварц-полевошпатовая составляющая представлена неокатанными литокластами гранитов, отдельными зернами кварца и полевых шпатов, глинистый цемент – монтмориллонит (> 30 %), иллит (1–5 %), хлорит (1–3 %). Из акцессорных минералов установлены циркон, сфен, монацит и др. Во всех изученных образцах присутствует растительный детритдо 2–5 %. Содержание урана в этих образованиях не превышает кларковых значений, но при увеличении органического вещества его концентрации возрастают до первых сотых %. В кровле осадочного разреза развиты торфяно-почвенные осадки с терригенной примесью, мощность продуктивного слоя 2–5 метров. Урановая минерализация главным образом приурочена к самому верхнему горизонту, обогащенному растительной органикой низкой степени углефикации (остатки корневой системы и др.). Контрастное оруденение формируется в «активном» почвенно-торфяном слое, в той части зоны многолетней мерзлоты, которая оттаивает в весенне-летний период и интенсивно обогащена органическим веществом [2]. Содержание урана в среднем составляет 0,5 %, на отдельных участках до 2 %. Оруденелые торфяно-почвенные образования также наследуют особенности химического состава материнских гранитоидов, что отражается в повышении концентраций U, Mo, Cu, Pb, Th и TR. В этих отложениях среди почвообразующих минералов преобладает кварц и полевой шпат, составляющие ~ 50 % от суммы минеральных фаз. Содержание КПШ не превышает 12–14 %. Глинистыеагрегатыпредставлены главным образом монтмориллонитом (> 30 %). В рудах наряду с локально проявленной сульфидной минерализацией присутствует гетит, что характеризует неравновесную окислительно-восстановительную обстановку, которая могла

способствовать миграции U^{+6}. Акцессорные минералы представлены сфеном, цирконом, монацитом, рутилом, анатазом, фторапатитом, ильменитом и др.с микропримесями урана и тория. Количество растительного органического вещества в почвенно-торфяном слое варьирует в пределах 14–70 %.

Материалы и методы

В целях изучения условий формированияповерхностного уранового оруденения в торфяно-почвенных отложениях на рудопроявлениях Орогочи и Сиротинка проведены детальные минералого-геохимические исследования. В рудовмещающем комплексе охарактеризованы две разности рудных образований – с высокими концентрациями урана, обогащенные органикой, и более бедные – с дресвяно-щебнистой составляющей. Также проанализированы образцы радиоактивных гранитоидов. Исследования выполнены с применением как традиционных, так и прецизионных методов в аккредитованных лабораториях ФГБУ «ВИМС».Аналитические методы включали следующие виды анализов: рентгеноспектральный (РСА) осуществлялся на рентгенофлуоресцентном волновом спектрометре MagiX-Pro; рентгенографический фазовый (РКФА), на спектрографе X'-pert-PRO – определение минерального состава; атомно-эмиссионный (ICP-AES), ICP-MS (масс-спектральный), α-спектрометрический, γ-спектрометрический – характеристика редкометальной составляющей; микрорадиографическим методом по распределению треков на поверхности комбинированных шлифов и аншлифов изучен характер распределения урановых концентраций. Для характеристики микростроения тонкодисперсных минеральных систем, идентификации микрофаз, определения реального состава и строения минералов проведены исследования на рентгеновском микроанализаторе (РСМА) JEOL JXA 8100, укомплектованном энергодисперсионной приставкой INCA (аналитик Киселёв А. А.) и на электронном растровом микроскопе (РЭМ) (аналитик Ружицкий В. В.).

Результаты и их обсуждение

Химический состав крупнозернистых гранитоидов $\gamma J_3 h$ амананского интрузивного комплекса, слагающих фундамент, характеризуетсярядом элементов ссодержаниями, превышающими их кларковыеконцентрации и определяющими геохимическую специфику интрузива. Ниже приведены содержания этих элементов в масс. %, кларки концентрацииуказаны в скобках: U ~ 0,0015 (4,73), Th ~ 0,002 (1,12), Th/U ~ 1,3, Mo ~ 0,003 (23,5), Pb ~ 0,004 (2,1), Cr – 0,004 (4,1) иредких элементов – Nd ~ 0,002 (3,7), Cs ~ 0,003 (6,3), а также U подвижный (8–20 % от общего урана). В составе рудоносных торфяно-почвенных отложений выявлен комплекс элементов, унаследованных от специализированных на уран гранитоидов фундамента. Усредненные содержания этих элементов в рудах (масс. %), в скобках показаны их кларки концентрации следующие:U – 0,29 (774), Th ~ 0,005 (4,3), Mo ~ 0,004 (13,6), Pb ~ 0,003 (2), Th/U – 0,02. Редкие элементы с содержанием более трех кларков представлены церием (рис. 1).

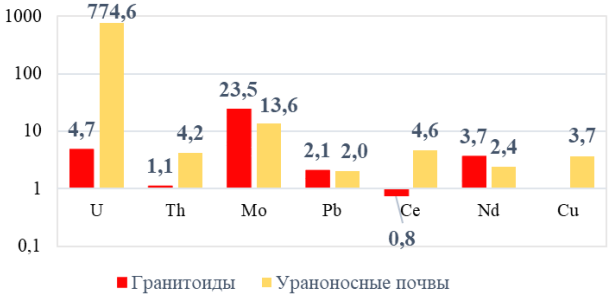


Рис. 1. Сравнительная характеристика геохимических спектров элементов в почвах и гранитоидахВитимо-Каренгского района относительно кларковых концентраций

На объектах Каренгского района выделяются дверазности рудных образований – торфяно-почвенные, приуроченные к горизонту торфяно-почвенных отложений, обогащенных слаборазложившейся растительной органикой ($C_{орг}$ ~ 15 % и более), с высокими (до первых процентов) содержаниями урана, и суглинисто-дресвяные, с многочисленными включениями дресвы и щебня. Последние локализуются в верхней части дресвяно-щебнистых отложений, обедненных органическим веществом ($C_{орг}$ ~ 2 %) и с более низкими – тысячные, первые сотые, до 0,1 % концентрациями урана. Химический состав торфяно-почвенных руд (композитные технологические пробы) характеризуется присутствием следующих элементов (масс. %): U – 0,68, Mo – 0,01, $C_{орг.}$ – 15,28, $Fe_2O_{3общ.}$ – 2,27, FeO – 1,41, а суглинисто-дресвяные – U – 0,091, Mo – 0,0021, $C_{орг.}$ – 2,31, $Fe_2O_{3общ.}$ – 0,94, FeO – 0,84. Сопоставительный анализ химического состава этих разностей показывает, что в обогащенных органикой рудах существенно увеличиваются: $C_{орг}$ – более чем в 7 раз, Mo – на порядок, $Fe_2O_{3общ}$ – более чем в 2 раза, FeO (закисное) – в 1,5 раза, а также незначительно (на первые проценты) возрастают содержания S и CaO. Торий-урановое отношение (Th/U) чрезвычайно низкое – $7,8 \cdot 10^{-3}$, т. е. руды практически бесториевые (рис. 2).

Отмечается прямая корреляция между содержаниями органического вещества и урана. Данные химических анализов руд, обогащенных растительным детритом и ураном, показывают высокиезначения ППП (потери при прокаливании), достигающие 46 и более %, что связано, главным образом, с присутствием в пробах органики (~ 15 %). Рудные образования различаются и по количественным соотношениям породообразующих компонентов. Дресвяно-щеб-

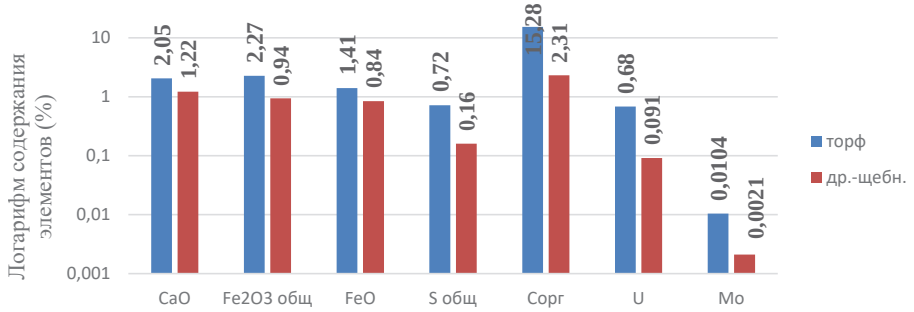


Рис. 2. Диаграмма распределения элементов в композитных пробах торфяно-почвенных и дресвяно-щебнистых отложений рудопроявленияОрогочи

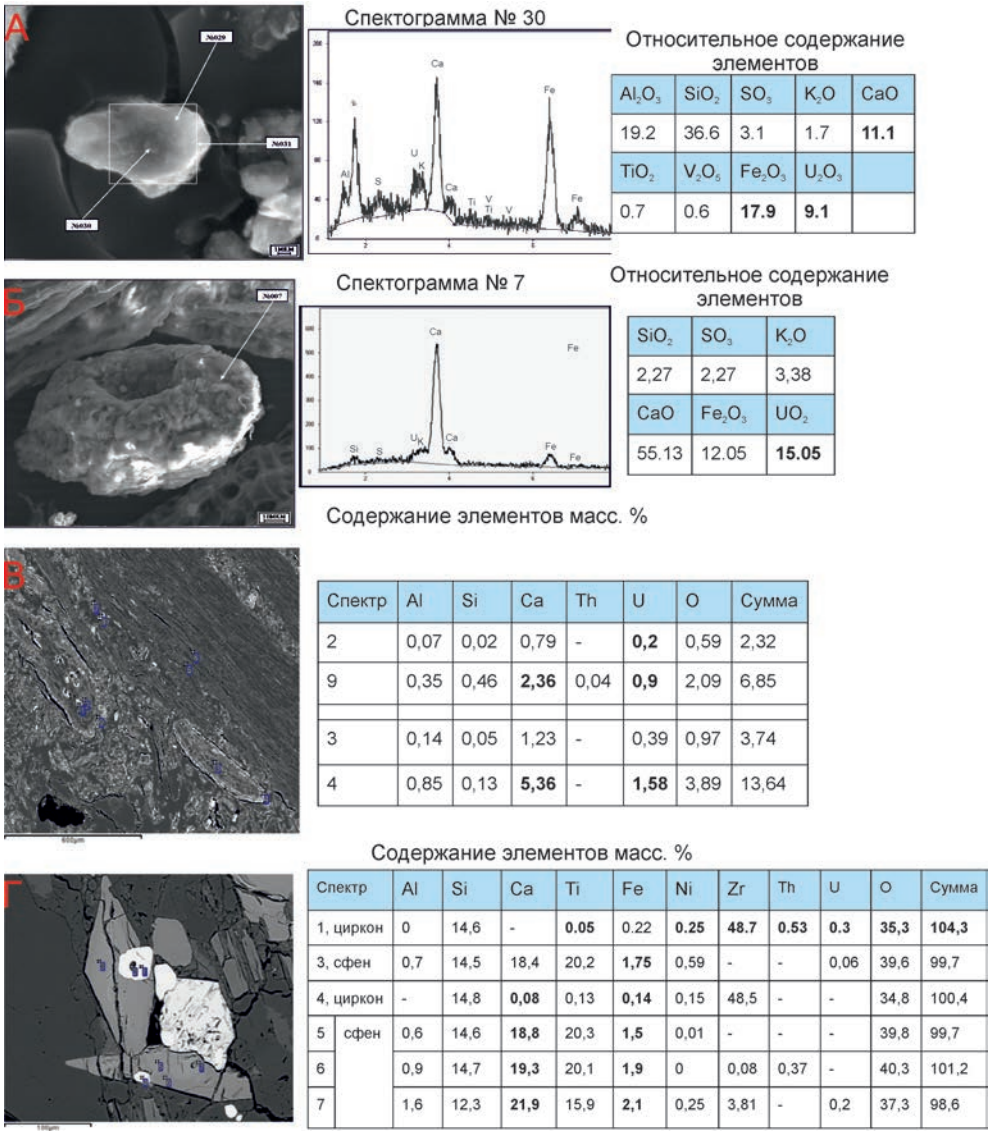


Рис. 3. Особенности развития урановой минерализации в рудных торфяно-почвенных отложениях

Растровая электронная микроскопия: А – скорлуповидное образование органического вещества, обогащенное ураном, Б – корковидные обособления; карбонатизированные фрагменты растительной органики.
РСМА, изображения в обратно-рассеянных электронах: В – рудные илисто-торфяные отложения;в матрице многочисленные фрагменты растительной органики. Г – клиновидные кристаллы сфена, зерна циркона, содержащие U, Nb, Th, Sr (спектр 1, 4)

нистые отложения характеризуются стандартным содержанием породообразующих элементов: SiO_2 (71,5 %), Al_2O_3 (13,8 %), Na_2O (2,3 %), K_2O (5,5 %). В торфяно-почвенных их концентрация уменьшается минимум в два раза: SiO_2 (36,6 %), Al_2O_3 (9 %), Na_2O (0,68 %), K_2O (1,98 %), но при этом увеличивается количество MgO (0,69), P_2O_5 (0,23), CaO (3,56), S (1,34), TiO (0,33). В дресвяно-щебнистых отложениях отмечаются многочисленные включения акцессорных минералов: сфенапатит, монацит, циркон и др. Как правило, все они обогащены ураном и редкими элементами. По данным зондовой микроскопии, кристаллы циркона содержат примесиурана, тория, ниобия, стронция. По соотношению содержаний урана и тория выделяются две разновидности циркона: с преобладанием в этих соотношенияхв одних случаях тория – до 12 %, в других – урана, до 0,7 %. Акцессорная минерализация с редкими и радиоактивными элементами характеризует урановую специализацию материнских гранитоидов – наиболее вероятный источник рудного вещества.

В образцах богатых руд исследованы особенности распределения урановых концентраций, непосредственно связанных с растительными остатками. При детальном изучении фрагментов растительного детрита методом РСМА установлено неравномерное распределение урана в пределах частиц органического вещества. Более высокие концентрации отмечаются в периферических зонах, преимущественно в участках с ячеистой древовидной структурой, где помимо урана также фиксируются повышения содержания железа и редких элементов – Y, La, Ta, Th, Sr. Причем в центральной части растительного детрита концентрация урана уменьшается, как правило, на порядок. Одновременно с увеличением содержания урана увеличивается и количество кальция (рис. 3).

По данным РЭМ основная часть урановых накоплений представлена рентгеноаморфной фазой, связанной с полиэлементными стеклоподобными гелями и другими частицами. На поверхности слоистых алюмосиликатов, обогащенных углеродистым веществом, локализуются дисперсные аморфные каплевидные гелеподобные изометричные неустойчивые, хорошо растворимые обособления с относительными концентрациями U до 10 %. Уран концентрируется в растительных остатках с ячеистой древовидной структурой, а также в шаровидных почвенных конкрециях размером 200–500 мкм. Высокие содержания урана также связаны со скорлуповидными образованиями, сложенными углеродистым веществом и слоистыми алюмосиликатами (рис. 3). Наряду с перечисленными выше ураноносными обособлениями установлены остатки бактерий, импрегнированные оксидами (гидроксидами) железа.Несмотря на высокие концентрации U, приуроченные к глинистым образованиям и растительномудетриту, собственных минеральных форм урана не выявлено. Это подтверждается и особенностями распределения треков на авторадиографиях (время экспозиции 30 суток). Вуалевидные треки, несмотря на высокие содержания урана в исследуемых препаратах, равномерно распределяются по поверхности рудных образцов, демонстрируя отсутствие собственных минеральных фаз урана, с которыми былибысвязаны точечные треки высокой плотности. Представляется, что в почвенно-торфяных отложениях концентрации U главным образом обусловлены подвижными, легкорастворимыми его накоплениями в виде ионно-сорбционной «пропитки» глинистых и органических образований. Эволюция рудного процесса ограничилась здесь лишь образованием урансодержащих многокомпонентных гелей без раскристаллизации собственных минеральных фаз урана.

Заключение

Положительными факторами для формирования уранового оруденения поверхностного типа являются: наличие в области питания специализированных на уран пород (гранитоиды и др.), развитие дезинтегрированных кор выветривания – возможных источников рудного вещества; обогащенность почв растительной органикой, играющей роль сорбционно-восстановительного барьера; активные процессы выщелачивания, которые маркируются наличием подвижного U; развитие речных долин 3–4 порядка с питанием торфяной системы урансодержащими грунтовыми водами; развитие областей многолетней мерзлоты с сезонным оттаиванием, что способствует повышению проницаемости пород и активизации грунтово-инфильтрационных процессов.

В отличие от промышленного уранового оруденения «витимского» типа в терригенных отложениях палеодолинных структур, где рудная минерализация с течением времени эволюционировала от многокомпонентных урансодержащих гелей до мономинеральной фазы, в формировании руд Витимо-Каренгского района проявлена лишь ранняя экзодиагенетическая стадия рудогенеза с концентрацией урана в безминеральной форме, в основном, в виде многокомпонентных гелей. Она связана с отложением современного почвенно-торфяного слоя, обогащенного растительной органикой, Th и TR (стадия седиментогенеза с механической миграцией компонентов пород); с формированием в нем грунтовыми водами в периоды сезонного оттаивания молодых приповерхностных концентраций U и сопутствующих элементов – Mo, Pb, Cu и др. (стадия экзодиагенеза) с концентрированием U и сопутствующих компонентов на сорбционно-восстановительном геохимическом барьере. Эволюция рудообразующего процесса ограничилась здесь лишь образованием урансодержащих многокомпонентных гелей без раскристаллизации собственных минеральных фаз урана.

Литература

1. Водяницкий Ю. Н., Гребенкин Н. А., Манахов Д. В., Сащенко А. В., Тюленева В. М. Положительные аномалии содержания урана в торфяниках гумидной зоны (обзор) // Почвоведение. – М., 2019. – № 12. – С. 1492–1501.
2. Карпунин А. М., Миронов Ю. Б и др. Криолитогенез как механизм уранового накопления в осадочных породах // Материалы по геологии урана, редких и редкоземельных металлов. – М., 2011. – Вып. 157. С. 25–32.
3. Петров О. В., Миронов Ю. Б., Лебедева Г. Б., Пуговкин А. А., Шатов В. В. «Поверхностные» месторождения – новое направление развития минерально-сырьевой базы урана России // Разведка и охрана недр. – М., 2015. – Вып. 10. – С. 75–82.
4. Пешков П. А., Суматов Ю. М., Шумилин М. В. Молодой уран России // Разведка и охрана недр – М., 2015. – Вып. 10. – С. 24–28.
5. Тарханова Г. А., Прохоров Д. А. Генетические особенности формирования уранового оруденения «Витимского типа» // Разведка и охрана недр. – М., 2017. – Вып. 11. – С. 47–59.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОУГЛЕРОДА В ПОЧВАХ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

З. Б. Сержанова, А. М. Раимканова, О. Н. Ляхова, А. К. Айдарханова

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК
Курчатов, Казахстан, serzhanova@nnc.kz

METHODOLOGICAL APPROACHES FOR RADIOCARBON RESEARCH IN SOILS OF SEMIPALATINSK TEST SITE

Z. B. Serzhanova, A. M. Raimkanova, O. N. Lyakhova, A. K. Aidarkhanova

Branch «Institute of Radiation Safety and Ecology» RSE NNC RK
Kurchatov, Kazakhstan, serzhanova@nnc.kz

The paper provides experimental data, obtained using a liquid-scintillation method of determining radiocarbon (^{14}C) concentrations. Methodological approaches were developed for radiocarbon analysis using Pyrolyser-6 Trio system for samples ignition and ashing. The accuracy of the research results was assessed by analyzing certified radiocarbon standards. As the result of experimental works, quantitative values of ^{14}C concentration in soils of Semipalatinsk Test Site were obtained for the first time. Radiocarbon concentrations were found to be non-uniformly distributed over the territory researched. The highest concentrations of radiocarbon were registered directly at the epicenters of surface nuclear tests.

Введение

В связи с высокими темпами развития атомной индустрии оценка состояния окружающей среды сегодня является одним из приоритетных направлений исследований. Проблема исследования поведения ^{14}C в окружающей среде в районах размещения предприятий ядерного-топливного цикла (ЯТЦ) и в местах проведения ядерных испытаний изучена недостаточно. Однако контроль за содержанием и миграцией данного радионуклида является одной из важных задач для экологии и безопасности жизнедеятельности человека.

Радиоуглерод – долгоживущий изотоп с периодом полураспада 5730 лет. В природных условиях он образуется в верхних слоях атмосферы под воздействием космического излучения. Радиоуглерод техногенного происхождения поступает в атмосферу при испытаниях ядерного оружия («бомбовый углерод») и при работе ядерных реакторов, как промышленных, так транспортных и исследовательских [3].

Поступление отходов ядерного цикла в окружающую среду приводит к процессам загрязнения и повышения радиационной опасности. Радиоуглерод, образующийся в процессе рабочего цикла ядерного реактора, частично или полностью выбрасывается в окружающую среду в виде газоаэрозолей, а содержащийся в топливе реактора – с радиоактивными отходами. Радиоуглерод, окисленный во внешней среде до $^{14}CO_2$, в процессе фотосинтеза накапливается в растениях, а затем по пищевым цепочкам поступает в организм животных и человека. Разрушающее воздействие радиоуглерода на живые организмы определяется его биологическим сродством к тканям живого организма [4].

Так как радиоуглерод является своеобразным маркером техногенного загрязнения, исследование его распределения в природных объектах является составной частью мониторинга окружающей среды. Радиоуглерод способен накапливаться и оставаться долгое время в биотических и абиотических компонентах экосистем, что позволяет проводить ретроспективный и текущий анализ состояния окружающей среды [1].

Исследования радиоуглеродав целях радиационного контроля и радиоэкологического мониторинга до настоящего времени в Казахстане не проводились. Прежде всего, это обусловлено отсутствием дорогостоящего оборудования для высокоточного определения содержания ^{14}C. Также, определенные затруднения у исследователей вызывают достаточно трудоемкие и затратные по времени методы подготовки проб и проведения измерений.

В ходе данной работы решались следующие задачи:

- определить основные параметры, влияющие на химический выход ^{14}C при применении системы для прокаливания и озоления проб Pyrolyser-6 Trio;
- исследовать уровни содержания ^{14}C в почве испытательной площадки «Опытное поле».

Материалы и методы

1.1. Объект исследования

Исследования проведены на площадке «Опытное поле», которая являлась первой испытательной площадкой на СИП. Территория площадки представляет собой равнину диаметром порядка 20 км и площадью около 300 км^2, окруженную с трех сторон невысокими холмами. На ее территории в период с 1949 по 1962 было проведено 116 ядерных испытаний (86 воздушных и 30 наземных).

В качестве участков исследований выбраны основные технические площадки «Опытного поля» – П-1, П-2, П-3, П-5, П-7 (рисунок 1). На технических площадках (П-1, П-3, П-5) проводились наземные ядерные испытания. В местах проведения наземных испытаний имеются воронки с навалами грунта и фрагментами оплавленной почвы, содержащей продукты ядерных взрывов. Значительное радиоактивное загрязнение местности распространяется на сотни метров от эпицентров. Мощность дозы на навалах некоторых воронок превышает 40 мкЗв/ч [5].

На технических площадках П-2, П-7 проводились гидроядерные и гидродинамические эксперименты, в процессе которых практически отсутствовало значимое ядерное энерговыделение. Это привело к образованию небольшого количества «продуктов деления», поэтому радиационное воздействие на окружающую среду в ходе их осуществления, в основном, происходило за счет диспергирования ядерных взрывчатых веществ (делящихся материалов), входящих в состав взрывных устройств.

1.2. Методология исследований

Методология исследований заключалась в отборе проб почвы на выбранных участках исследования и определении концентрации ^{14}C в почве жидкосцинтилляционным методом в подготовленных образцах.Для этого на каждом участке была отобрана проба на глубину 0–10 см с площади 100 см^2. Пробы почвы собирались в чистые полиэтиленовые пакеты. Отобранные образцы почвы высушивали до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при температуре 105 °С, удаляли включения (камни, корни растений и т. п.) и гомогенизировали.

Для подготовки проб – прокаливания и озоления, использовалась автоматизированная система Pyrolyser-6 Trio, специально разработанная для эффективного извлечения ^{3}H, ^{14}C, а также других летучих радионуклидов из различных матриц (почва, донные отложения, пищевые продукты, биота, бетон и другие строительные материалы, металлы и биопробы).

При исследовании ^{14}C подключается барботер, содержащий уловитель ^{14}C, в качестве которого используется CARBO-SORB®E. Воздух пускается по пробе, которая в свою очередь поступательно нагревается до максимальной температуры, используя заданный цикл линейного изменения. К концу прогона дополнительное количество кислорода перемешивается с воздухом для полного окисления. Продукты горения пробы пропускаются по катализатору из 0,5 % оксида алюминия и платины, нагретого до 800 °С в печи с зоной катализатора. Радионуклидные компоненты преобразуются в тритиевую воду и радиоактивную двуокись углерода ($^{14}CO_2$), захват

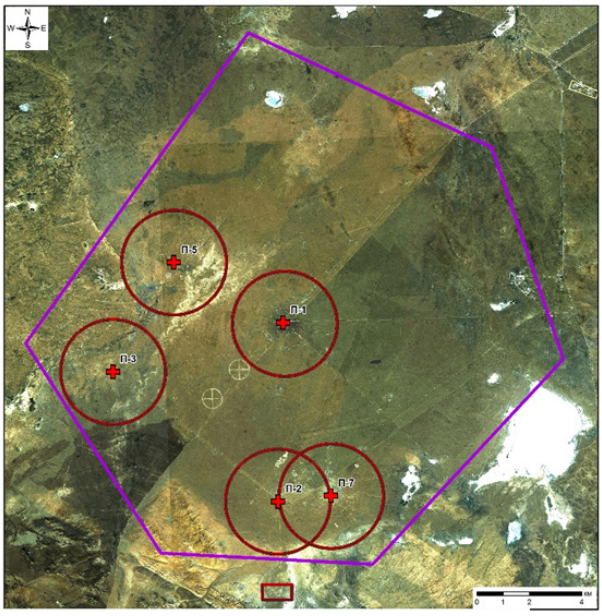


Рис. 1. Технические площадки на «Опытном поле»

которых происходит в барботажных устройствах, заполненных соответствующими химическими уловителями.

Эффективное горение проб зависит от профиля линейного изменения, применяемого к печи с зоной проб. Быстрое нагревание пробы приводит к отсутствию контроля за горением, неэффективному захвату радионуклидов в барботажных устройствах и возможному повреждению рабочих трубок из кремниевого стекла. Наиболее приемлемый цикл нагрева будет зависеть от матрицы проб и формы нахождения радионуклидов в пробе. Pyrolyser-6 Trio имеет 8 предустановленных программ, разработанных для сжигания различных типов образцов.

Для оценки возможного влияния температурного фактора на химический выход ^{14}C и выбора оптимального температурного режима, эксперименты проведены с помощью программ «Normal» и «Graphite» с продолжительностью анализа 4 и 6 часов, соответственно. Данные программы являются наиболее подходящими для анализа почвы, так как обеспечивается эффективное горение проб.

Производительность процедуры сжигания (включая производительность катализатора) оценивалась посредством анализа сертифицированных стандартов. Также проводился мониторинг общего накопления фоновых уровней активности. Для извлечения ^{14}C на приборе Pyrolyser-6 Trio, в качестве стандартов возможно использование сертифицированного ^{14}C-тимидина или ^{14}C-карбоната. В наших исследованиях применен стандартный образец ^{14}C, представленный в виде неорганического соединения карбоната натрия. Начальная активность ^{14}C в стандартном образце до сжигания составляла 3430 ± 515 Бк/л.

В некоторых случаях горение жидких проб, а также проб почвы, богатых органическими веществами, может привести к разбрызгиванию, стремительному, неконтролируемому образованию газообразных продуктов распада, в результате чего может произойти разрыв рабочих кварцевых трубок. Учитывая это, существуют ограничения по массе анализируемой пробы и ее подложке. С целью обеспечения стабильного горения жидких проб были использованы подложки в виде песка, промытого 10 % раствором соляной кислоты, и фильтровальной бумаги. Масса песка составила 3 г, размеры фильтровальной бумаги – 10 × 40 мм. На выбранные подложки наносились стандартные растворы объемом 0,5 мл при помощи градуированной пипетки.

На эффективное извлечение ^{14}C при прокаливании и озолении проб на Pyrolyser-6 Trio могут повлиять абсорбирующие свойства реагента CARBO-SORB®E. В ходе экспериментальных исследований изучено влияние количества подаваемого абсорбента. Объемы CARBO-SORB®E, вводимые в барботажные устройства, составили 10 мл, 15 мл, 20 мл.

Таким образом, оценка точности радиоуглеродного анализа проводилась при изменении 3-х основных составляющих анализа, которые могут оказать наибольший эффект на конечный результат – это матрица образца, температурный режим и количество подаваемого абсорбента. Учет и контроль данных параметров гарантирует получение высококачественных и воспроизводимых проб для жидкосцинтилляционного метода анализа.

Бета-спектрометрические измерения концентрации ^{14}C проводились на основе аттестованной методики [2]. Определение удельной активности ^{14}C в полученных образцах осуществлялось с использованием высокочувствительного альфа-бета радиометра SL-300. На начальном этапе выполнялась калибровка радиометра по эффективности с использованием калибровочных стандартов ^{14}C фирмы PerkinElmer с построением кривой гашения, которая хорошо согласуется с заводской.

Для подготовка счетных образцов с барботажных устройств ^{14}C отбиралась аликвота объемом 7 мл, которая смешивалась с 12 мл сцинтилляционной жидкости PERMAFLUOR® E+. Время измерения одного образца составляло 300 мин. Минимальная детектируемая активность составила 4 Бк/кг.

Результаты и их обсуждение

Параметры, влияющие на химический выход ^{14}C при окислительных процессах

Результаты экспериментов, проведенных с учетом влияния матрицы образца и температурного режима на эффективность извлечения ^{14}C, представлены в таблице 1.

По результатам проведенных исследований следует, что при анализе стандартного образца ^{14}C можно использовать подложки в виде песка и фильтра, так как в обоих случаях наблюдается эффективное извлечение ^{14}C. Эти вещества обладают впитывающими свойствами, что обеспечивает стабильное горение стандартного образца. Использование данных программ окислительного процесса показывает высокий химический выход ^{14}C, который в среднем составил 93–94 %. Однако, для дальнейших исследований стандартных растворов можно использовать более экспрессный метод с использованием программы «Normal».

В результате экзотермической реакции взаимодействия углекислого газа с абсорбентом CARBO-SORB®E в барботажных устройствах образуется карбамат, который при смешивании со сцинтиллятором 14C PERMAFLUOR® E+, представляет собой счетный образец. Объемы абсорбента, вводимые в барботажные устройства, составили 10 мл, 15 мл, 20 мл. Из результата анализа, следует, что при исследовании повышенных концентраций ^{14}C оптимальным объемом абсорбента является 20 мл.

Таблица 1. Влияние матрицы образца и температурного режима на химический выход ^{14}C

№	Тип подложки	Удельная активность ^{14}C, Бк/кг «Normal» (T = 600 °C)	Химический выход ^{14}C, %	Удельная активность ^{14}C, Бк/кг «Graphite» (T = 900 °C)	Химический выход ^{14}C, %
1	песок	3050 ± 460	89	3490 ± 520	100
2	песок	3100 ± 470	90	3170 ± 480	93
3	песок	3120 ± 470	91	3140 ± 470	91
4	фильтр	3300 ± 500	96	3210 ± 480	94
5	фильтр	3370 ± 510	98	3170 ± 480	92
6	фильтр	3150 ± 470	92	3300 ± 500	96
среднее			93		94

Определение уровня содержания ^{14}C в почве технических площадок «Опытного поля»

Для апробации предлагаемого метода было принято решение провести определение уровня содержания ^{14}C в почве в местах проведения ядерных испытаний на технических площадках «Опытного поля». Так как почва представляет собой многокомпонентную систему, важнейшей составляющей частью которой является органическое вещество, подготовка проб проводилась при двух заданных программах «Normal» и «Graphite» для оценки химического выхода ^{14}C под воздействие разных температур. В ходе проведенных исследований получены количественные данные по ^{14}C, представленные на рисунке (рисунок 2).

По результатам исследований следует, что наиболее эффективное извлечение ^{14}C из почвы обеспечивалось при использовании более высокого температурного режима. Следовательно, для проб с высоким содержанием органического вещества следует использовать температуру до 900 °C. По полученным данным наблюдается неравномерный характер распределения ^{14}C в почвах исследовательских участков. Наиболее высокое содержание радиоуглерода зафиксировано в эпицентрах площадки «Опытное поле», которое достигало до 2500 Бк/кг.

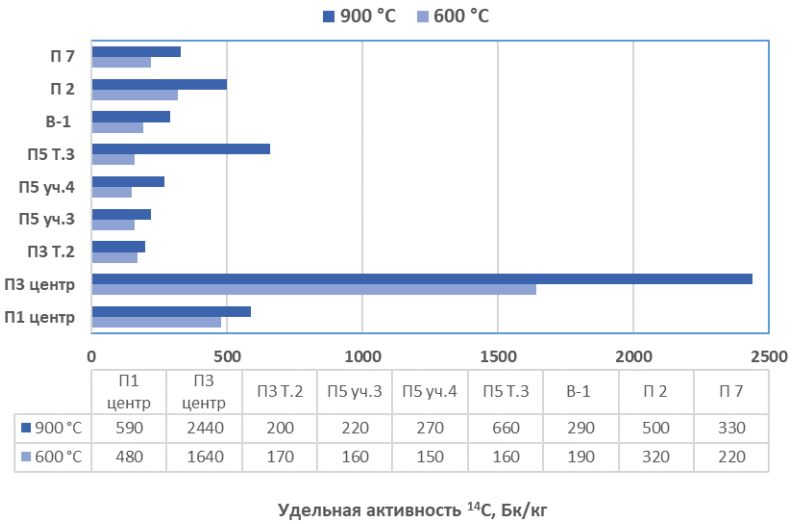
Заключение

Определение концентраций ^{14}C с помощью системы для прокаливания и озоления проб Pyrolyser-6 Trio потребовало разработки методических подходов, гарантирующих получение достоверных данных. Одной из первоочередных задач являлось использование сертифицированных стандартов для контроля качества результатов исследований.

Важным моментом при разработке методического подхода исследования ^{14}C являлось выявление основных факторов, влияющих на радиоуглеродный анализ. В ходе проведенных исследований определены особенности анализа растворов и проб почвы. Анализ жидких образцов показал эффективность использования подложек в виде фильтра и песка. Альтернативной программой для прокаливания и озоления жидких образцов на Pyrolyser-6 Trio предложена экспрессная программа «Normal» (T = 600 °C) с продолжительностью анализа 4 ч. Пробы почв с высоким содержанием органического вещества рекомендуется исследовать по программе «Graphite» (T = 900 °C), которая обеспечивает полное количественное восстановление ^{14}C из исследуемого образца. Также, входе экспериментальных работ установлено, что оптимальный объем химического уловителя CARBOSORB®E в барботажных устройствах должен составлять 20 мл.

Таким образом, методические подходы, разработанные и апробированные на натурных образцах почв с площадки «Опытное поле», показали значимость проводимых исследований. По результатам экспериментов на исследуемой площадке определены повышенные концентрации ^{14}C, достигающие 2500 Бк/кг. Более того, выявлен неравномерный характер распределения ^{14}C в почвах: радиоактивное загрязнение местности приурочено непосредственно к местам проведения испытаний – эпицентрам и эпицентральным зонам. Данные исследования требуют продолжения работ по изучению вертикального распределения ^{14}C по почвенному профилю и пополнению базы данных по радиоуглеродному мониторингу исследуемой территории.

Разработанный методический подход будет в дальнейшем использован для проведения комплексных исследований распределения ^{14}C в почве, растительности и водных объектах, что позволит выявить потенциальные источники радиоактивности и проследить динамику радиоактивного загрязнения окружающей среды во времени.



	П1 центр	П3 центр	П3 Т.2	П5 уч.3	П5 уч.4	П5 Т.3	В-1	П 2	П 7
900 °C	590	2440	200	220	270	660	290	500	330
600 °C	480	1640	170	160	150	160	190	320	220

Рис. 2. Распределение ^{14}C в почвах площадки «Опытное поле»

Литература

1. Калашникова Д. А., Волков Ю. В., Маркелова А. Н. и др. Радиоуглерод и тритий в объектах окружающей среды. Практическое использование этих радиоизотопов. – Материалы V Международной конференции, г. Томск, 13–16 сентября 2016 г. – С. 274–277.
2. Качество воды. Определение активности ^{14}C. Метод жидкостного сцинтилляционного счета. Международный стандарт ISO 13162. – I изд. 01.11.2011. – С. 2–5.
3. Колосов И. Л., Родионов А. А., Г. И. Лучина и др. Радиоуглеродный и тритиевый мониторинг системы гидросфера-биосфера в районе размещения Белорусской АЭС. – Журнал ЛІТАСФЕРА 1 (48), 2018. – С. 86–94.
4. Михайлов Н. Д., Колковский В. М., Павлова И. Д., Лучина Г. И. Радиоуглерод в ландшафтах Беларуси // Літасфера, 2003. – № 2 (19). – С. 130–139.
5. Семипалатинский испытательный полигон. Современное состояние. – Издание 3-е, переработанное и дополненное. – Павлодар: Дом печати, 2017. – С. 6–8.

МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ Am, Pu, U, Tc ИЗ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ МОРСКОЙ И ПРЕСНОЙ ВОДЫ

А. М. Сибирцев[1], О. А. Ширабон[1], А. К. Рожкова[1,2], Н. В. Кузьменкова[1,2]

[1]Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, Россия, sibircev01@gmail.com
[2]Институт геохимии и аналитической химии имени В. И. Вернадского РАН
Москва, Россия

METHODS FOR THE EXTRACTION OF Am, Pu, U, Tc FROM LARGE VOLUMES OF SEA AND FRESH WATER

A. M. Sibirtsev[1], O. A. Shirabon[1], A. K. Rozhkova[1,2], N. V. Kuzmenkova[1,2]

[1]Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia, sibircev01@gmail.com
[2]Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia

The long-lived content radionuclides determination in natural waters is an important task in radioecology. However, large volumes of natural water samples require additional preconcentration. Model experiments have been carried out for co-precipitation of actinides and ^{99}Tc with iron (II and III) hydroxides and manganese oxide, followed by separation using different chromatographic resins. Wehave adapted and made universalmethod for the concentration and separation of Am, Pu, U and Tc from natural samples of large volumes with yields of 40–70 %.

Введение

С середины прошлого века большое количество искусственных радионуклидов поступило в окружающую среду. Особенное внимание уделяют долгоживущим изотопам, которые позволяют отследить пути миграции радионуклидов, а также служат метками для анализа движения водных масс, оценки уровня загрязнения и эрозии почв.

Наиболее долгоживущими изотопами америция являются ^{241}Am ($t_{1/2}$ = 433 года, E_α = 5,5 МэВ) и ^{243}Am ($t_{1/2}$ = 7380 лет, E_α = 5,3 МэВ). Америций широко используется в детекторах и как источник низкоэнергетического гамма-излучения. В природе естественный америций не встречается, а его основным источником является отработанное ядерное топливо.

Плутоний применяется в производстве ядерного оружия и ядерной энергетике. Основными промышленными изотопами являются ^{238}Pu, ^{239}Pu, ^{240}Pu и ^{241}Pu. В природе встречаются незначительные количества ^{239}Pu в урановых рудах (^{239}Pu/^{238}U = 1,5 • 10^{-12}). Большинство находимого плутония – результат глобальных выпадений после испытаний ядерного оружия и переработка ядерного топлива.

Самыми распространенными изотопами урана являются ^{238}U и ^{235}U. Облучением урана получают большое количество искусственных радионуклидов – ^{239}Pu, ^{99}Mo и др. Большое значение в ядерной энергетике имеет ^{233}U, который является перспективным топливом.

Среди всех изотопов технеция в окружающей среде встречается ^{99}Tc, который с относительно высоким выходом (6 %) образуется в результате облучения ^{235}U тепловым нейтронами. Основным источником технеция-99 является переработка ядерного топлива.

Анализ содержаний радионуклидов в мировом океане сопряжен с рядом трудностей. При работе с низкими концентрациями радионуклидов в природных водах объём пробы составляет 100–200 л, поэтому необходимо дополнительно проводить преконцентрацию искомых радионуклидов. Таким образом целью работы был анализ методов концентрирования и выделения Pu, Am, Uи Tc и их адаптация для работы с большими объемами природных проб.

Материалы и методы

Модельные растворы морской и пресной воды были приготовлены на основании реальных составов природных водоемов.Состав приведен в таблице 1.

Для регистрации альфа-излучения использовался многоканальный альфаспектрометр с полупроводниковыми детекторами – Alpha-Ensemble-2. Для регистрации бета-излучения использовался жидкостно-сцинтилляционный спектрометр – Tri-Carb 2810TR, спектры обрабатывались с помощью программного обеспечения SpectraDec.

Для выделения технеция из природных проб применяется осаждение его нерастворимых форм в степени окисления +4 совместно с $Fe(OH)_2$ [2, 3, 4]. Было проведено три эксперимента по выделению ^{99}Tсиз модельных растворов морской и пресной воды.

Модельный эксперимент 1. Проводилось выделение технеция-99 из модельных растворов морской и пресной воды(объём пробы – 500 мл, добавляемая

Таблица 1. Составы модельных растворов морской и пресной воды

Ион	Модельный раствор морской воды, × 10^{-3} М	Модельный раствор пресной воды, × 10^{-3} М
Na^{+}	507	0,57
K^{+}	8,7	0,03
Mg^{2+}	52,2	0,25
Ca^{2+}	10,1	0,17
Sr^{2+}	0,08	–
Cl^{-}	591	0,27
SO_4^{2-}	24,8	0,42
HCO_3^{-}	2	0,57
Br^{-}	0,74	–
H_3BO_3	0,37	–
F^{-}	0,07	–

активность – 25 Бк). Технеций соосаждался совместно с гидроксидом железа II. В качестве источника Fe^{+2} и восстановителя использовалась твердая соль $FeSO_4 \cdot 7H_2O$. К анализируемому раствору добавляли Fe^{2+} (10 г/л), при этом Tc^{+7} восстанавливается до Tc^{+4}. Для создания щелочной реакции среды (pH = 8–9) и формирования гидроксида железа II использовали концентрированный раствор аммиака (25 %). Осадок отделяли фильтрованием на бумажном фильтре, промывали водой. Полученный осадок растворяли в HClконц., добавляли 37 % раствор H_2O_2 для перевода технеция и железа в высшие степени окисления. Затем добавляли избыток концентрированного раствора аммиака для осаждения $Fe(OH)_3$, полученный осадок отделяли фильтрованием на бумажном фильтре, промывали водой. Из полученного раствора технеций выделяли методом анионообменной хроматографии на колонке DOWEX 1x8-200, колонку подготавливали 20 мл дистиллированной воды, пропускали пробу, промывали 20 мл дистиллированной воды, смывали 20 мл 10 М раствора HNO_3. Элюент упаривали и измеряли активность.

Был проведен эксперимент выделения технеция из модельных растворов морской и пресной воды методом совместного осаждения с $Fe(OH)_2$, при этом Fe^{2+} образуется в результате восстановления Fe^{3+}.

Модельный эксперимент 2. Раствор пробы подкисляли HClконц. (pH 2–3), добавляли Fe^{3+} в виде раствора $FeCl_3$ (8 мг/л), восстановитель $K_2S_2O_5$ (0,5 г/л). После окончания процесса восстановления – перехода окраски из коричневой в почти бесцветную, к раствору добавляли 6 М раствор NaOH до pH 8–9. Выпавший осадок $Fe(OH)_2$ отделяли фильтрованием, промывали водой. Затем растворяли с помощью HClконц., к полученному раствору добавляли восстановитель $K_2S_2O_5$ (1 г/л), послеокончания восстановления кполученномураствору добавляликонцентрированный раствор аммиака до щелочной реакции среды (pH = 8–9). На этом шаге отделялся $Mg(OH)_2$, так как большое содержание Mg^{2+} может препятствовать прохождению раствора через хроматографические колонки. Получаемый осадок $Fe(OH)_2$ фильтровали на бумажном фильтре, затем растворяли с помощью HClконц. Далее переводили технеций и железо в высшие степени окисления, добавляя 37 % раствор H_2O_2 до прекращения изменения цвета. Для отделения осадка $Fe(OH)_3$ добавляли 6 М раствор NaOH (pH = 9–10). Полученный раствор подкисляли до pH 2–3, добавляли Fe^{2+} (0,2 г/л) и восстановитель $K_2S_2O_5$ (5 г/л). После окончания процесса восстановления добавляли 6 М раствор NaOHдо pH 9–10. Осадок отделяли фильтрованием на бумажном фильтре, промывали водой. Затемрастворяли в 8 М растворе HNO_3 добавляли 37 % раствор пероксида водорода для перевода технеция и железа в TcO_4^{-} и Fe^{3+} соответственною. Добавляли щелочь до pH 9–10, осадок $Fe(OH)_3$ отделяли фильтрованием. Получаемый раствор подкисляли 8 М раствором HNO_3 до 0,1 М HNO_3, пропускали через колонку со смолой TEVA. Колонку подготавливали 20 мл 0,1 М раствора HNO_3, пропускали пробу, промывали 40 мл 1 М раствора HNO_3, смывали 10 мл 8 М раствора HNO_3. Элюент упаривали и измеряли активность.

Модельный эксперимент 3. После проведения второго модельного эксперимента были выявлены недостатки двух методик. В результате методика второго эксперимента была модифицирована: увеличено количество добавляемого железа с 0,8 мг/л до 800 мг/л, увеличено количество добавляемого восстановителя $K_2S_2O_5$ с 0,5 г/л до 4 г/л. Остальные действия модельного эксперимента 2 были сохранены без изменений.

Для выделения актинидов из природных проб морской и пресной воды используется соосаждение их нерастворимых форм совместно с гидроксидом железа II и диоксидом марганца.

Модельный эксперимент 4. Адаптированная методика модельного эксперимента 3 была применена для выделения смеси радионуклидов из модельных растворов морской и пресной воды объемом 4 л. Были добавлены следующие радионуклиды: ^{241}Am – 94 Бк, ^{239}Pu – 88 Бк, ^{233}U – 85 Бк и ^{99}Tc – 59 Бк. Действия были аналогичными методике модельного эксперимента 3 за исключением того, что осадок гидроксида железа (III), отделяемый перед повторным добавлением железа, содержит основные количества добавляемых актинидов [1, 5, 6]. Поэтому осадок $Fe(OH)_3$ не отбрасывали, а растворяли в HClконц. и проводили выделение радионуклидов по стандартной методике (EichromTechnologies, Inc. ACW17VBS) с использованием смол TEVAи TRU, с последующим совместным осаждением с CeF_3.

В качестве альтернативного метода концентрирования актинидов было исследовано соосаждение нерастворимых форм Am, Pu и U с диоксидом марганца [7, 8].

Модельный эксперимент 5. Выделение проводилось из модельных растворов морской и пресной воды (4 л), добавленные активности составили ^{241}Am – 95 Бк, ^{239}Pu – 177 Бк, ^{233}U – 170 Бк.Образец модельной воды подкисляли до pH 1–2 с помощью 4 М раствора HCl, добавляли насыщенный раствор $KMnO_4$ (0,6 мл/л), смесь тщательно перемешивали в течение 5 минут. Затем смесь подщелачивали до нейтральной среды с помощью 6 М раствора NaOH, далее до pH 8–9 с помощью 1 М раствора NaOH. Для формирования диоксида марганца при перемешивании медленно добавляли 0,1 М раствор $NaHSO_3$, который реагировал с перманганатом калия, окисляясь до Na_2SO_4, в течение всего процесса восстановления среда должна оставаться щелочной, pH измерялис помощью pH-метра, и при необходимости добавляли 0,1 М раствор NaOH. Об окончании формирования MnO_2 судили по отсутствию розовой окраски смеси, нельзя допускать избытка восстановителя, поскольку возможно растворение осадка диоксида марганца. Осадок отстаивался, максимально возможный объём раствора декантировали, осадок отделяли фильтрованием через бумажный фильтр, промывали водой, затем растворяли на фильтре с помощью 0,1 М раствора $NaHSO_3$ при подкислении 1 М раствором HCl. Актиниды выделяли из получаемого раствора по стандартной методике с использованием смол TEVA и TRU, с последующим совместным осаждением с CeF_3.

Результаты и их обсуждение

Результаты модельных экспериментов по выделению технеция из растворов морской и пресной воды представлены в таблице 2.

В модельном эксперименте 1 наблюдаются высокие выходы – 96 % и 90 % для модельных растворов морской и пресной воды соответственно, однако большое количество осадка, необходимое для концентрирования технеция не позволяет применять данную методику для анализа природных проб ввиду больших объёмов.

В модельном эксперименте 2 выходы по технецию составили–12 % и менее 5 % для растворов морской и пресной воды соответственно, которые не позволяют использовать данную методику для определения содержания технеция в природных объектах, тем не менее количество осадка оптимально для работы с большими объёмами.

В модельном эксперименте 3 после применения адаптированной методики увеличились выходы по технецию относительно модельного эксперимента 2 и составили 38 % и 33 % для растворов морской и пресной воды соответственно. Объём осадка был меньше, чем в модельном эксперименте 1. Полученные результаты позволяют применять адаптированную методику для работы с малыми концентрациями технеция в больших объёмах природных проб.

Дополнительно был проведен эксперимент, который показал, что раствор, пропускаемый через колонку TEVA может иметь щелочную среду – pH = 10, при этом выход выделения технеция составляет более 95 %.

В результате применения адаптированной методики для выделения актинидов из модельных растворов морской и пресной воды получены следующие выходы, которые представлены в Таблице 3. Результаты полученные для Pu и Unозволяют применять адаптированную методику для определения содержания радионуклидов в природных образцах. Низкие выходы для Am обусловлены неточным выполнением методики выделения радионуклида на смолах TEVAи TRU.

В качестве альтернативного метода концентрирования актинидов был опробован метод соосаждения с диоксидом марганца – модельный эксперимент 5. Полученные результаты (таблица 3) свидетельствуют обэффективности метода, однако по некоторым радионуклидам наблюдается меньший выход, чем по адаптированной методике эксперимента 4, поэтому для анализа природных проб предпочтительнее универсальная методика соосаждения радионуклидов с $Fe(OH)_2$, с анализом отделяемого осадка $Fe(OH)_3$.

Таблица 2. Модельные эксперименты выделения ^{99}Tc

Эксперимент	Модельный раствор	Количество осадка	Уменьшение объёма	Выход
Модельный эксперимент 1	Морская вода	• Большой объем осадка • Сложно отделять	В 2 раза	96 ± 8 %
	Пресная вода		В 2 раза	90 ± 7 %
Модельный эксперимент 2	Морская вода	• Малое количество осадка • Разделение фильтрованием	В 17 раз	12 ± 5 %
	Пресная вода		В 22 раз	< 5 %
Модельный эксперимент 3	Морская вода	• Среднее количество осадка • Разделение с использованием водоструйного вакуумного насоса	В 10–15 раз	38 ± 3 %
	Пресная вода		В 10–15 раз	33 ± 4 %

Таблица 3. Модельные эксперименты выделения ^{241}Am, ^{239}Pu, ^{233}U

Эксперимент	Модельный раствор	Выход по актинидам		
		^{241}Am	^{239}Pu	^{233}U
Модельный эксперимент 4	Морская вода	< 5 %	62 ± 3 %	43 ± 2 %
	Пресная вода	< 5 %	67 ± 3 %	41 ± 3 %
Модельный эксперимент 5	Морская вода	56 ± 4 %	35 ± 2 %	19 ± 1 %
	Пресная вода	44 ± 2 %	52 ± 5 %	23 ± 1 %

Заключение

Проведен анализ методов концентрирования и выделения технеция и актинидов (Am, Pu, U) из морской и пресной воды. Предложена адаптированная методика для выделения технеция из больших объёмов природных проб, для модельных растворов морской воды выходы составили для технеция – 38 %, плутония – 62 % и урана – 43 %, для модельных растворов пресной воды выходы составили 33 %, 67 % и 41 %. Сравнение адаптированной методики соосаждения актинидов с гидроксидом железа с альтернативным способом концентрирования с диоксидом арганца доказало ее эффективность для выделения актинидов из природных проб морской и пресной воды.

Данные результаты позволяют применять адаптированную методику для определения содержания технеция, америция, плутония и урана в природных водах при их совместном присутствии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-43-00025).

Литература

1. Hou X., Radioanalysis of ultra-low level radionuclides for environmental tracer studies and decommissioning of nuclear facilities / X. Hou // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2019. – № 322. – P. 1217–1245.
2. Shi K., Determination of technetium-99 in environmental samples: A review / K. Shi, X. Hou, P. Roos, W. Wo // Analytica Chimica Acta, 2012. – № 709. – P. 1–20.
3. Shi K., Rapid Determination of Technetium-99 in Large Volume Seawater Samples Using Sequential Injection Extraction Chromatographic Separation and ICP-MS Measurement / K. Shi, J. Qiao, W. Wu, P. Roos, X. Hou // Analytical Chemistry, 2012. – № 84. – P. 6783–6789.
4. Алиев Р. А., Определение ^{99}Tc в загрязнённых природных водах / Р. А. Алиев, С. Н. Калмыков, Р. В. Хрестенко, И. Г. Тананаев // Вопросы радиационной безопасности, 2007. – № 3. – С. 10–16.
5. Lozano J. C., Preparation of alpha-spectrometric sources by co-precipitation with $Fe(OH)_3$: application to uranium / J. C. Lozano, F. Fernandez, J. M. G. Gomez // Applied Radiation and Isotopes, 1999. – № 50 (3). – P. 475–477.
6. Lozano J. C., Preparation of Alpha-spectrometric sources by coprecipitation with $Fe(OH)_3$: Application to actinides / J. C. Lozano, F. Fernandez, J. M. G. Gomez // Applied Radiation and Isotopes, 1997. – № 48 (3). – P. 383–389.
7. Wang J. M., Extraction of thorium, uranium and cerium from fresh water using manganese dioxide coprecipitation / J. M. Wang, R. Ballad, P. Grimaldi, W. Lei // Journal of Radioanalytical Chemistry, 1983. – № 76 (1). – P. 105–108.
8. Wong K. M., A rapid procedure for plutonium separation in large volumes of fresd and saline water by manganese dioxide coprecipitation / K. M. Wong, G. S. Brown, V. E. Noshkin // Journal of Radioanalytical Chemistry, 1978. – № 42. – P. 7–15.

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА НА ТЕРРИТОРИИ В ЮЖНОЙ ЯКУТИИ

П. И. Собакин, А. П. Чевычелов, А. Н. Горохов

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН
Якутск, Россия, radioecolog@yandex.ru

RADIOECOLOGICAL SITUATION IN THE TERRITORY OF SOUTHERN YAKUTIA

P. I. Sobakin, A. P. Chevychelov, A. N. Gorokhov

Institute of Biological Problems of the Cryolithozone SB RAS
Yakutsk, Russia, radioecolog@yandex.ru

Using field radiometry methods, radioecological studies were conducted in the areas of monazite and uranium deposits in Southern Yakutia. Areas with an increased radiation background of natural and man-made origin were identified. It is shown that at present, in some areas in the southern part of Yakutia, the radioecological situation is characterized as unfavorable.

Введение

Южная часть территории Якутии, приуроченная к Алдано-Становому щиту, представляет собой кристаллический фундамент Сибирской платформы. С первых лет осуществления специальных поисковых работ на радиоактивное сырье данная территория привлекал к себе внимание в связи с перспективами выявления промышленных месторождений урана и тория. Оптимистические прогнозы в значительной мере базировались на успехах в поисках и разведке U–Th монацитовых россыпей в Центрально-Алданском районе при решении вопросов комплексной добычи различных видов минерального сырья в золотоносных россыпях [15]. Первые поисково-разведочные работы на россыпях монацита на Алданском нагорье проведены в 1930–1940 гг. Установлено широкое распространение монацита в аллювиальных отложениях Алданского, Тыркандинского, Учурского, Сутамского и других рудных районов Южной Якутии [1]. Из 205 речных долин, исследованных на Алдано-Становом щите, промышленная концентрация монацита обнаружена на 149. В 1949 г. с учетом возможного использования тория в атомной промышленности Правительством СССР было принято решение начать добычу монацита в Якутской АССР на р. Васильевка – правом притоке р. Ороченка. Несколько позднее необходимость в торийсодержащем сырье отпала и в 1952 г. добыча монацита была прекращена [10]. В начале 60-х годов в северной части Алданского нагорья были открыты урановые месторождения в пределах Эльконского сводово-глыбового поднятия и сразу же стали объектом интенсивных геолого-разведочных работ и научных исследований. Здесь запасы урана по 22 месторождениям были впервые утверждены ГКЗ СССР в 1968 г. Позднее, продолжался разведка основных участков главной рудоносной структуры района – зоны Южной и крупного месторождения зоны Северной, разведанные запасы, которых переутверждены ГКЗ в 1981 г. [7]. В 1984 г. дальнейшие исследования были прекращены, а месторождения отнесены к резервным. В Эльконском урановорудном районе геологоразведочные работы сопровождались извлечением из подземных горных выработок (шахты, штольни) на дневную поверхность огромной массы радиоактивных горных пород и руд, которые стали перманентно действующими бесконтрольными источниками радиоактивного загрязнения природной среды [11, 12, 17].

В настоящее время в южной части территории Якутии радиоэкологические исследования в целом проведены слабо. Целью настоящей работы является оценка современной радиоэкологической обстановки территорий некоторых монацитовых и урановых месторождений полевыми радиометрическими методами.

Материалы и методы

В ходе радиоэкологических работ нами проведены радиометрические обследования россыпей монацита (Малый Нимныр, Ороченка, Васильевка, Николькин Ключ, Керак, Большой Нимныр) расположенных вблизи Амуро-Якутской автомагистрали на участке между рр. Большой и Малый Нимныр. Исследования проводились в поймах и на надпойменных террасах рек по обеим сторонам от указанной магистрали с максимальным удалением 0,2–5,0 км. Мощность экспозиционной дозы γ-излучения измеряли радиометром СРП-68-01, концентрацию естественных радионуклидов (^{40}K, ^{238}U (по ^{226}Ra) и ^{232}Th) –спектрометром МКС-АТ-6101Д. Согласно методическим указаниям измерения выполнены на ровной поверхности поймы и слабозадернованной части террас по произвольной сети точек [2, 6]. Отдельные маршрутные радиометрические замеры проведены на промплощадках (шахты и фабрика) месторожде-

ния Васильевка, а также на выходах кристаллических пород на водоразделах – гранитах, кристаллических сланцев и гнейсов. Расстояние между точками измерения составляло от 2–5 до 200 м. Площадная радиометрическая съемка по прямоугольной сети (250 × 100 м) проведена только на участке месторождения Васильевка. В Эльконском урановорудном районе радиометрические исследования проведены на законсервированных геологоразведочных участках месторождений Элькон, Эльконское плато, Курунг, Непроходимое, Дружное и др. Здесь радиометрические измерения на поверхности отвалов радиоактивных пород и руд выполнены по произвольной сети. При этом содержание радона в воздухе над отвалами и его плотности потока с поверхности измеряли с помощью радиометра «Альфарад Плюс» и пробоотборного устройства АВ-07 по методике, принятой в Госстандарте РФ [3].

Результаты и их обсуждение

По полученным данным, мощность экспозиционной дозы (МЭД) γ-излучения в долинах рек Малый Нимныр, Ороченка, Васильевка, Николькин Ключ, Керак и Большой Нимныр изменяется от 16 до 420 мкР/ч (табл. 1). Для сравнения отметим, что в 2019 г. радиационный фон на территории Республики Саха (Якутия) находился в пределах 6–33 мкР/ч, в среднем равнялся 12 мкР/ч [4]. Таким образом, максимальная величина мощности дозы γ-излучения в описываемом районе в 2019 г. превышает таковую по Якутии в 12,7 раз, а ее средний показатель – в 35 раз. При этом содержание ^{40}K в аллювиальных отложениях поймы и надпойменных террас изменяется от 0,4 до 6,5 • 10^{-4} %, ^{238}U – от 0,5 до 17,1 • 10^{-4} %, а ^{232}Th – от 14 до 1140 • 10^{-4} % (табл. 1) т. е. в 16–81 раз. Изменчивость концентрации естественных радионуклидов (ЕРН) в аллювиях тесно связана с наследованием ими радиогеохимического состава горных пород на водосборных площадях и процессами формирования россыпей. По результатам гамма-спектрометрических измерений в районе наших исследований кристаллические сланцы и гнейсы водоразделов характеризуются в основном нормальными фоновыми концентрациями ЕРН, граниты – повышенным содержанием тория, а частично и урана. В водораздельных гранитах рр. Большой Нимныр, Васильевка и Николькин ключ, например, концентрация тория составляет 30–390 • 10^{-4} %. В аллювиях рек аномальные содержания тория и урана могут превышать их кларковые величины в горных породах (10 • 10^{-4} % и 2,5 • 10^{-4} %) до 110 и 6 раз. Эффективная удельная активность радионуклидов (Аэфф.) в аллювиях обследованной территории изменяется в широком диапазоне – от 166 до 6261 Бк/кг. Эти отложения аллювия (пески, галечники и валунники) по Аэфф. относятся в основном к первому, второму и третьему классам (166–1500 Бк/кг) строительных материалов, допускаемых к использованию в дорожном строительстве внутри и вне населенных пунктов, а также при возведении производственных и жилых зданий. В отдельных участках долин рек названные отложения не пригодны для хозяйственного использования, так как их Аэфф. превышает 4000 Бк/кг – максимально допустимую санитарно-эпидемиологическую нормы [8].

В районе расположения монацитовой россыпи Васильевка радиогеохимические особенности территории четко отражаются на картах МЭД и содержаний ЕРН (рис. 1). Площади распространения метаморфических пород (кристаллические сланцы, гнейсы) на картах концентраций ^{238}U и ^{232}Th отмечаются относительно невысокими их значениями и соответственно пониженными величинами МЭД (менее 10–20 мкР/ч). На карте МЭД аномальные участки, разобщенные изолиниями 20–60 мкР/ч и приуроченные к руслу р. Васильевка и руч. Озерный, представляют слабо задернованную наиболее обнаженную часть монацитовой россыпи. На этих участках форма изолиний МЭД хорошо совпадает с формой изолиний ^{232}Th, что указывает на ториевую природу аномалий. В районе исследования гранидоиты являются основными источниками монацитовой россыпи и незначительно охвачены радиометрической съемкой только на юго-западной части площади обследования. Данные породы на карте гамма-поля выделяются изолиниями более 20–40 мкР/ч. При этом на картах в местах распространения гранидоитов, конфигурация изолиний МЭД очень сопоставима с таковой, характерной для ^{232}Th. Техногенная радиоактивная аномалия, обнаруженная в районе расположения обогатительной фабрики, по площади немного расширена из-за прямоугольной сети наблюдения. Здесь на поверхности почвогрунтов зафиксирован самый высокий показатель МЭД γ-излучения – 1600 мкР/ч, превышающий региональный фон (23 мкР/ч) в 69 раз, который тесно связан с загрязнением промплощадки фабрики шлихами, обогащенные торием. В структуре гамма-поля исследованной площади локальные радиоактивные аномалии не находят отображения, а на карте нанесены в виде отдельных точек (рис. 1). Данные радиоактивные аномалии были обнаружены в ходе проведения маршрутных радиометрических измерений на промплощадках шахт и в долинно-пойменной части водотоков. Более интенсивные аномалии техногенного происхождения с МЭД 178, 580, 720 и 740 мкР/ч зафиксированы возле шахт, в пределах небольших участков с площадью около 160–1100 м^2. Здесь загрязнения почворунтов торием, а также частично и ураном, связаны с первичным обогащением песков. В поймах и на надпойменных террасах р. Васильевка и руч. Озерный участки с МЭД 130, 210 и 420 мкР/ч, представляющие аномалии естественного происхождения, приурочены к местам концентрирования монацита в аллювиях [19].

Результаты радиометрических измерений показали, что в отвалах радиоактивных пород на участках

Таблица 1. Мощность экспозиционной дозы, содержание и эффективная удельная активность радионуклидов в аллювиальных отложениях рек

Река	n*	Мощность дозы, мкР/ч	^{40}K	^{238}U	^{232}Th	Аэфф.
			n • 10^{-4} %			Бк/кг
Большой Нимныр	13	45 ± 35** / 18–150	4,6 ± 0,9 / 3,1–6,5	2,4 ± 1,7 / 0,5–5,1	75 ± 80 / 14–310	527 ± 438 / 227–1863
Керак	12	32 ± 16 / 16–70	3,3 ± 1,3 / 1,2–5,0	0,9 ± 0,7 / 0,5–2,8	65 ± 41 / 21,3–160	425 ± 214 / 166–924
Николкин Ключ	17	59 ± 36 / 24–140	2,7 ± 1,8 / 0,4–5,4	1,9 ± 2,0 / 0,5–5,2	118 ± 112 / 16–390	701 ± 553 / 236–2060
Васильевка	16	105 ± 95 / 30–420	3,0 ± 1,0 / 0,5–3,7	8,2 ± 12,7 / 0,5–17,1	345 ± 800 / 27–1140	1290 ± 1435 / 232–6261
Ороченка	9	50 ± 20 / 30–82	2,6 ± 0,9 / 1,7–4,2	2,1 ± 1,2 / 0,5–3,7	104 ± 71 / 28–220	628 ± 366 / 243–1227
Малый Нимныр	34	43 ± 24 / 17–140	3,7 ± 1,1 / 1,2–4,7	3,6 ± 3,2 / 0,5–14,1	65 ± 57 / 17–308	468 ± 286 / 195–1652

*n – число измерений; **в числителе – среднее и его ошибка, в знаменателе – пределы колебания.

месторождений Элькон, Эльконское плато, Курунг, Непроходимое, Дружное, Таежное, Весеннее, Агдинское, Снежное, Невское, Интересное и Лунное концентрация ^{40}K варьирует от 2,0 до 13,9 • 10^{-4} %, ^{238}U – от 3,3 до 1530 • 10^{-4} %, а ^{232}Th – от 2,3 до 144 • 10^{-4} %. При этом на поверхности отвалов величина мощность экспозиционной дозы гамма-излучения изменяется от 11 до 1670 мкР/ч, т. е. более чем в 150 раз. В породах отвалов содержание ^{40}K и ^{232}Th удерживается на уровне их фоновых значений, характерных для горных пород, участвующих в геологическом строении исследуемой территории, а концентрация ^{238}U колеблется от фоновых (3,3 • 10^{-4} %) до рудных (1530 • 10^{-4} %) значений. За счет большого разброса содержания урана эффективная удельная активность радионуклидов в отвалах варьирует в очень широком диапазоне от 171 до 19658 Бк/кг. В результате отдельные их участки по величине Аэфф. могут быть классифицированы как первый, второй и третий классы строительных материалов. Однако в большей части отвалов значения Аэфф. существенно превышает предел радиационной нормы, установленный для строительных материалов (4000 Бк/кг) [8]. Отметим, что наиболее высокие величины Аэфф., зафиксированные в отвалах радиоактивных пород горных выработок месторождений Эльконское плато и Курунг, составляют 18840 Бк/кг и 19658 Бк/кг соответственно. В отвалах при пересчете содержании урана в единицах удельной активности его величина в большинстве случаев превышает значения минимально значимой удельной активности ($МЗУА_U$), установленные в нормах радиационной безопасности [8]. Поэтому из 35 обследованных отвалов 30 отвалов по удельной активности урана соответствуют к твердым радиоактивным отходам [9].

Существование более чем полувека на дневной поверхности бесхозяйных радиоактивных отвалов разведочных горных выработок способствовало масштабному радиоактивному загрязнению окружающей среды. В настоящее время ореол водного рассеяния ЕРН в аллювиальных пойменных почвах фиксируется на расстоянии от источников (отвалов) до несколько десятков км, а ореол ветрового рассеяния в почвах водоразделов – до 1 км [17]. Из отвалов с водами атмосферных осадков более интенсивно выщелачивается уран, поэтому, радиоактивное равновесие между ураном и радием в гидроморфных почвах, водных мхах и донных отложениях вблизи источников резко нарушено сторону избытка урана. Соответственно величина коэффициента радиоактивного равновесия между ураном и радием меньше единицы и составляет 0,008–0,4. Длительное воздействие радиоактивных отвалов на природную среду способствовало образованию радиоактивных отходов. На участках месторождений Эльконское плато и Курунг в зоне водного рассеяния ЕРН в пределах 150 м от отвалов удельная активность урана в некоторых компонентах ландшафтов (почва, растения и донные отложения) превышают его $МЗУА_U$ в несколько десятков раз [8, 13, 18].

Измерения концентрации радона в атмосферном воздухе над отвалами радиоактивных пород на участках месторождений Элькон, Эльконское плато, Курунг, Непроходимое, Дружное, Интересное и Лунное показали, что она изменяется от 20 до 390 Бк/м^3, а плотность его потока варьирует от 24 до 3611 мБк/с • м^2. Полученные величины существенно превышают фоновые концентрации радона в открытом воздухе, которые обычно изменяются от 2 до 6 Бк/м^3, при средней его плотности потока с поверхности земли равной примерно 16 мБк/с • м^2. Эксхаляция радона из пород отвалов в целом прямо коррелирует с концентрацией в них радия ($r = 0,60$, $P = 0,01$). Вместе с тем содержание радона в воздухе над от-

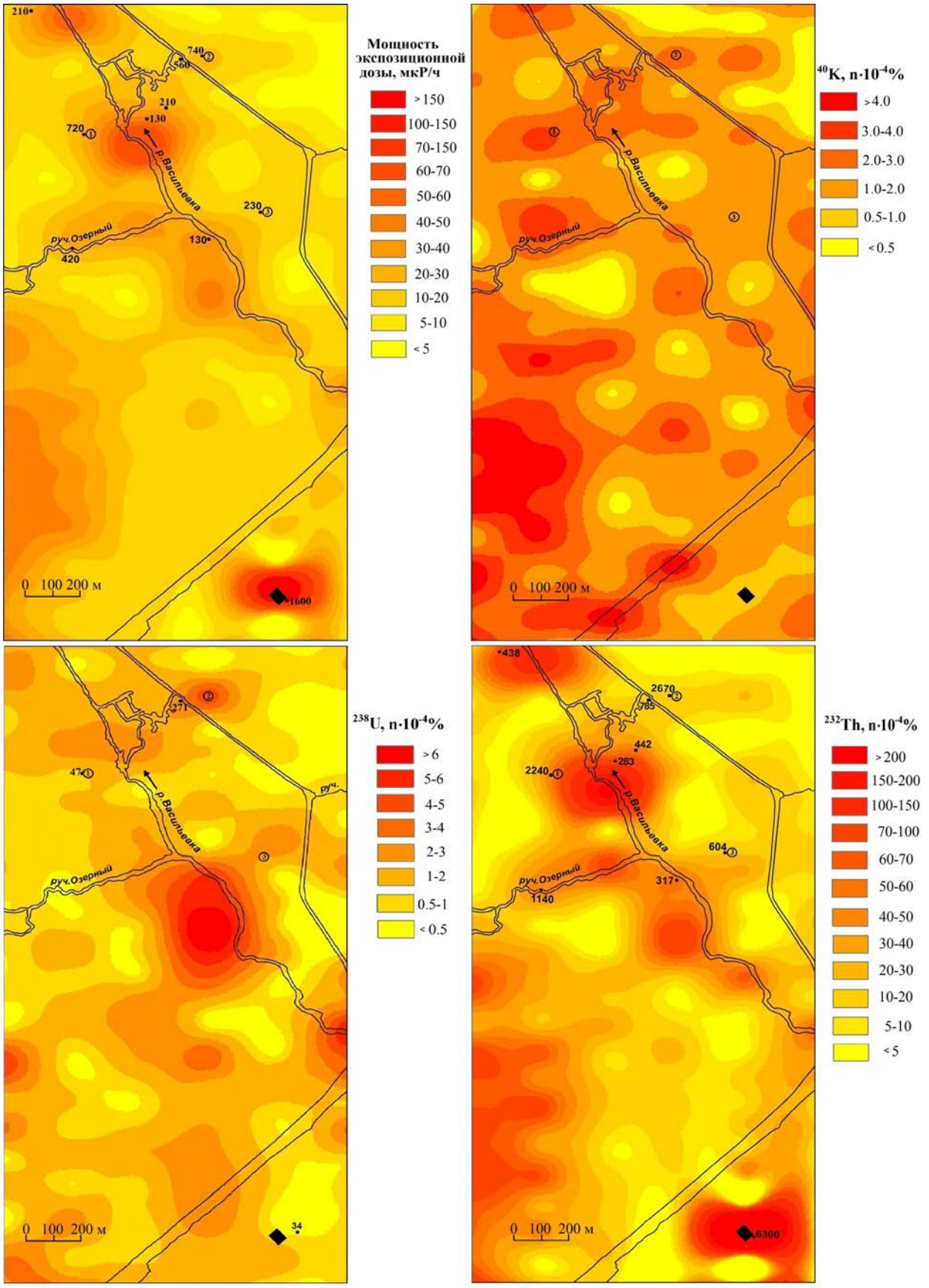


Рис. 1. Карта гамма-поля и концентраций ЕРН

валами практически не зависит от содержания радия в породах отвалов что, видимо, связано не с устойчивостью атмосферного воздуха над отвалами в связи с его интенсивной циркуляцией. Поэтому не случайно значения коэффициента корреляции между концентрацией радона в воздухе и концентрацией радия в породах по величине не высокая (r = 0,13) и статистически не достоверно. На скорость эксхаляции, по-видимому, кроме содержаний радия в мелкоземе отвалов, существенно влияет их возраст. Чем дольше находятся по времени отвалы пород на дневной поверхности, чем больше они подвергаются к разрушению с образованием мелкодисперсных гранулометрических фракций, способных более интенсивному эманированию радона. Поэтому не случайно наибольшая плотность потока радона (ППР) с поверхности отвалов, равная 3611 мБк/с • м^2, зафиксирована на участке месторождения Непроходимое при концентрации радия в породах 778 • 10^{-11} %, а не на месторождении Эльконское плато, где ППР с поверхности отвала составляет 2928 мБк/с • м^2 при самом высоком содержании радия 3233 • 10^{-11} % в породах среди изученных участков месторождений. Известно, что на территории горных выработок (штольни, шахты) месторождения Эльконское плато радиоактивные породы складированы в отвалы относительно позже, чем на месторождении Непроходимое. Складированные на дневной поверхности отвалы радиоактивных пород в Эльконском урановорудном районе в основном представляют отбитые при проходке разведочных подземных горных выработок горные массы забойной крупности. Поэтому в отвалах величина ППР с поверхности (24–3611 мБк/с • м^2) существенно ниже по сравнению с таковой в твердых фазах радиоактивных хвостов гидрометаллургического завода – 1700–30000 мБк/с • м^2 (Мосинец, 1991). Несмотря на это, отвалы подземных горных выработок Эльконского района и радиоактивные хвосты завода по величине гамма-активности соизмеримы – 52–1010 и 100–1400 мкР/ч соответственно. Как известно, в процессе переработки урановых руд на гидрометаллургическом заводе нетоварная часть измельченной руды попадает в хвосты, которые становятся источником эксхаляции радона в атмосферу [5].

В настоящее время в Эльконском урановорудном районе ведется добыча золота открытом способом на участке месторождение Лунное методом кучного выщелачивания. В результате существенно расширилась техногенная зона с повышенным радиационным фоном за счет штабелированных радиоактивных руд, карьеров и вскрышных радиоактивных пород.

Заключение

В настоящее время в отдельных районах Южной Якутии сложилась неблагополучная радиоэкологическая обстановка. Возрастающие масштабы радиоактивного загрязнения природной среды в данном регионе требуют особого внимания специалистов по охране окружающей среды и Роспотребнадзора.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту: № 0297-2021-0027, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21-121012190033-5.

Литература

1. Горошко М. В. Металлогения урана Дальнего Востока России. / Малышев Ю. Ф., Кириллов В. Е. – М.: Наука, 2006. – 272 с.
2. Инструкция по работе со сцинтилляционными радиометрами при геологических съемках и поисках / Отв. ред. А. Г. Ветров. – Ленинград: Рудгеофизика, 1986. – 44 с.
3. Измерительный комплекс «Альфарад Плюс» для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов распадов в различных средах. Руководство по эксплуатации. – М., 2011. – 87 с.
4. Краткий государственный доклад об экологической ситуации в Республике Саха (Якутия) в 2019 году / Правительство Республики Саха (Якутия) Министерство экологии, природопользования и лесного хозяйства Республики Саха (Якутия). [Электронный ресурс]. URL: https://minpriroda.sakha.gov.ru/doklady-o-sostojanii-okruzhajuschejsredyhttps (дата обращения 30.04.2021).
5. Мосинец В. Н. Радиоактивные отходы уранодобывающих предприятий и их воздействие на окружающую среду // Атомная энергия, 1991. – Т. 70. – Вып. 5. – С. 282–288.
6. Методика выполнения измерений эффективной удельной активности природных радионуклидов и поверхностной активности цезия-137 с применением спектрометра МКС-АТ6101Д. – Санкт-Петербург, 2007. – 13 с.
7. Машковцев Г. А. Уран Российских недр. / Константинов А. К., Мигута А. К., Шумилин М. В., Щеточкин В. Н. – М.: ВИМС, 2010. – 850 с.
8. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.25–2309. – М.: Фед. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.
9. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99). СП 2.6.1.799-99. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 83 с.

10. Пятов Е. А. Стране был нужен уран. История геологоразведочных работ на уран в СССР. Под. ред. Г. А. Машковцева. – М.: ВИМС, 2005. – 246 с.
11. Собакин П. И. Радиоэкологические исследования техногенно-нарушенных участков ландшафта в зоне уранового месторождения Республики Саха (Якутия) / Молчанова И. В. //Дефектоскопия, 1994. – № 9. – С.74–78.
12. Собакин П. И. Миграция тяжелых естественных радионуклидов в почвенно-растительном покрове в условиях техногенного загрязнения / Молчанова И. В. // Экология, 1998. – № 2. – С. 98–101.
13. Собакин П. И. Накопление тяжёлых естественных радионуклидов мхами Южной Якутии // Сибирский экологический журнал, 2002. – № 1. – С. 29–34.
14. Соломатин Г. Б. История создания минерально-сырьевой базы урана и пути решения вопросов урановосности Дальнего Востока и Якутии / Бражников А. С. // Разведка и охрана недр, 2005. – № 10. – С. 36–45.
15. Собакин П. И. Радиоэкологическая обстановка в местах геолого-разведочных работ и добычи радиоактивного сырья в Якутии / Герасимов Я. Р., Перк А. А. // Атомная энергия, 2014. – Т. 117. – Вып. 4. – С.235–238.
16. Собакин П. И. Миграция радионуклидов в поверхностных водах горно-таежных ландшафтов Эльконского урановорудного района / Чевычелов А. П., Герасимов Я. Р. // Геохимия, 2015. – № 11. – С. 1032–1042.
17. Собакин П. И. Естественные и искусственные радионуклиды в мерзлотных почвах Якутии: автореф. дис.... докт. биол. наук. – Улан-Удэ, 2015. – 39 с.
18. Собакин П. И. Радиоэкологическая обстановка в районе монацитовой россыпи в Южной Якутии / Герасимов Я. Р., Перк А. А. // Геохимия, 2019. – Т. 64. – № 4. – С. 440–448.

АНАЛИЗ ФОНОВОЙ И АНОМАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ РАДИОГЕОХИМИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

И. С. Соболев[1], К. А. Орехов[1], А. Н. Орехов[2]

[1]ООО «Гео Сервис»
Томск, Россия, geolsob@yandex.ru, orekhovan@mail.tomsknet.ru
[2]Томский политехнический университет
Томск, Россия, orekhovan@mail.tomsknet.ru

BACKGROUND AND ANOMALY COMPONENTS ANALYSIS OF THE RADIOACTIVE SPATIAL PATTERNS IN GAMMA-SPECTROMETRIC EXPLORATION FOR MINERAL RESOURCES

I. S. Sobolev[1], K. A. Orekhov[1], A. N. Orekhov[2]

[1]LLC «Geo Service»
Tomsk, Russia, geolsob@yandex.ru, orekhovan@mail.tomsknet.ru
[2]TomskPolytechnicUniversity
Tomsk, Russia, orekhovan@mail.tomsknet.ru

The paper discusses an algorithm for gamma-spectrometric data statistical processing to improve the reliability of altered rocks detecting. The radioactive backgrounds spatial variability is studied by k-means cluster analysis. Data integration and mapping of hydrothermal altered rocks is carried out by Principal Components Analysis (PCA).

Введение

Гамма-спектрометрическая съемка в геологоразведочном производстве привлекается для решения задач геологического картирования крупных территорий в аэроварианте реализации и выявления областей развития площадных и локальных наложенных изменений горных пород. Последние сопровождают процессы предрудной гидротермальной подготовки крупных геологических блоков и собственно рудной минерализации, а также эпигенетические преобразования осадочных толщ над залежами углеводородов.

Геохимия ^{40}K, ^{238}U и ^{232}Th, являющихся естественными радиоактивными элементами (ЕРЭ), хорошо изучена. Разнообразные аспекты поведения ЕРЭ

в эндогенных и экзогенных процессах освещены в большом количестве литературных источников. Главными при интерпретации гамма-спектрометрических съемок являются следующие моменты.

Дифференциация магматических и вулканических образований в распределении ЕРЭ выражается в синхронном увеличении концентраций радионуклидов от пород основного состава к кислым и с повышенной щелочностью.Изменчивость радиоактивности метаморфических пород хорошо увязывается с различием их первичного состава. С высокой прямой корреляцией происходит рост содержания ЕРЭ в ряду соленосные – карбонатные – кремнистые – терригенные образования. В гранулометрическом спектре терригенных осадков их уровни накопления упорядоченно увеличиваются от псаммитовых к алевритовым разностям. Во всех трех главных группах пород есть высокорадиоактивные представители, нарушающие общий тренд прямой корреляции изменчивости концентраций ЕРЭ [2, 5, 7, 8, 9, 14 и др.].

Иное распределение радионуклидов происходит при метасоматических изменениях горных пород. Их миграция определяется физико-химическими параметрами гидротермальных систем и химическим составом флюида. Наложенная трансформация минерального состава пород сопровождается появлением антагонизма в поведении ЕРЭ. Это определяет возможность использования радиометрических методов при поисках руд в т.ч. нерадиоактивных металлов, а также залежей углеводородов [1, 4, 10, 12, 15, 16, 18, 22, 23 и др.]. При гамма-спектрометрическом картировании измененных пород помимо информации о распределения ЕРЭ используют их отношения – K/Th, U/Th (Th/U), U/K. Наиболее сильная корреляции в различных типах горных пород и продуктах наложенных изменений характерна для K и Th [4, 19].Изменение миграционных свойств урана в зависимости от валентного состояния (U^{4+} и U^{6+}) определяет большую вариативность его содержаний по сравнению с K и Th в координатах физико-химических условий эндогенных и экзогенных процессов. При химическом выветривании горных пород ЕРЭ неодинаково активно вовлекаются в гипергенную миграцию. В результате соотношения концентраций между ними в материнских породах и корах выветривания могут сильно различаться. Дополнительные трудности создают экранирующие свойства растительного покрова и высокая обводненность отдельных элементарных ландшафтов.

Для оконтуривания радиоактивных аномалий часто используют регрессионный анализ. Разностная характеристика зависимого радиометрического параметра рассчитывается относительно линейного или нелинейного тренда его взаимосвязи с другими радиогеохимическими характеристиками. В результате удается снизить влияние фоновой флуктуации содержаний радиоактивных элементов, связанной с минеральным составом горных пород, а также формирующихся по ним кор выветривания и почв [14, 17, 20, 22]. Для интеграции многокомпонентной информации, в т. ч. концентраций ЕРЭ и производных отношений, используют факторный анализ методом главных компонентов (РСА) [13, 17, 21]. В отличии от регрессионных уравнений в РСА отсутствуют зависимые переменные, а информация разделена на набор компонентов, не коррелирующих между собой. Однако, иногда не происходит их удовлетворительного разделения начастные дисперсии от радиоактивности типов горных пород, ландшафтов иналоженных изменений. Компоненты высокого порядка статистически менее надежны и их обособление, главным образом, используется для уменьшения влияния высокочастотного шума [11, 17]. Перечисленные проблемы в меньшей степени относятся к классификационным моделям и, в частности, к полученнымкластер-анализом, который рекомендуется использовать в обработке гамма-спектрометрических измерений при геологическом картировании [17]. Чаще привлекается итерационная неконтролируемая кластеризация методом k-средних. Формирование групп происходит путем причисления наблюдения к тому кластеру, к центру (центроиду) которого оно ближе всего. Метод хорошо подходит для классификации больших объемов информации, а одноуровневое представление результатов простое для интерпретации.

Ситуация усложняется, когда гамма-спектрометрическая съемка проводится на территории с большим представительством измененных пород в общей структуре геологического строения. В основном это касается наземной гамма-спектрометрии, решающей задачи картирования околорудныхгидротермалитов в условиях пространственной близости к известным рудным месторождениям и проявлениям. В этих случаях радиоактивные характеристики метасоматитов начинают вносить существенный вклад в статистические модели, получаемые регрессионным и в меньшей степени многофакторным анализами. Как следствие, искажаются числовые критерии разделения фона и аномалий искомых объектов. Возможным решением данной проблемы является создание пространственных классификационных моделей распределения ЕРЭ и их использование для «выравнивания» уровня фона [6]. В материалах приводится пример реализации такого подхода при поисках зон гидротермальной Ag–Pb–Zn минерализации. В обработку данных внесены изменения, улучшившие достоверность получаемых результатов.

Методика и условия проведения

Наземная гамма-спектрометрическая съемка проводилась по сети 10 × 20 м. Концентрации ^{40}K, eU (по ^{226}Ra), ^{232}Th определялись полевым гамма-спек-

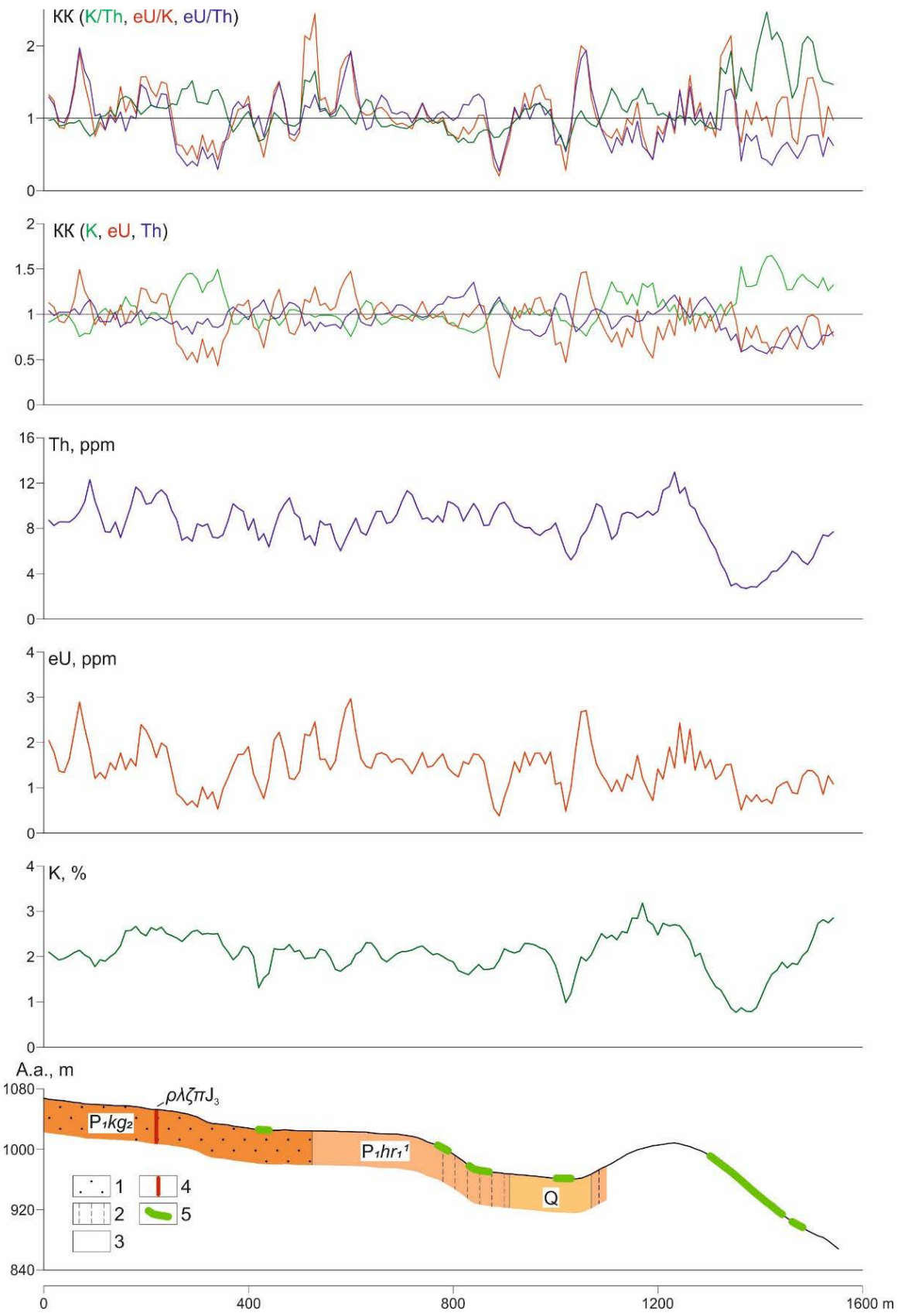


Рис. 1. Приповерхностное геологическое строение, графики содержаний и коэффициентов концентраций (КК) ЕРЭ и производных отношений по линии профиля

1 – средне-крупнозернистые песчаники с редкими прослоями алевролитов; 2 – переслаивание алевролитов, мелко-среднезернистых песчаников и алевропесчаников; 3 – мелко-среднезернистые алевролиты и алевритистые песчаники; 4 – дайка плагиориодацитовых порфиров; 5 – растительные экраны (по описанию операторов)

трометром МКСП-01 (производитель НТЦ «РАДЭК», г. Санкт-Петербург). Всего – 12126 точек физических наблюдений.

В пределах участка развиты верхнепалеозойские терригенные породы, прорванные разновозрастными дайками среднего и кислого состава [3]. Гидротермальные процессы и Ag–Pb–Zn рудообразование парагенетически связаны с раннемеловыми магматическими процессами.Ранний этап – образование золотосульфидной и золотомедно-порфировой минерализации. На позднем этапе происходило формирование серебро- и серебро-полиметаллического промышленного оруденения. Поздний этап имеет разрыв во времени с ранним, но временная величина его не ясная. Околожильные гидротермальные изменения выражены, главным образом, фельдшпатизацией, хлоритизацией и серицитизацией вмещающих пород. Наиболее ярко проявлены гидротермальные изменения калиевой специализации. Кварц-гидрослюдистые продукты низкотемпературных гидротермальных изменений ассоциируют с поздними рудами, обогащенными сурьмой и с низким содержанием серебра. Жилы поздних безрудных образований формируют сливной и друзовидный молочно-белый кварц в парагенезисе с кальцитом и баритом.

В геоморфологическом отношении территория представляет собой среднегорное плато с плоскими водоразделами и крутыми склонами (рис. 1). Относительные превышения 400–500 м. Район принадлежит зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Преобладают ландшафты горной тундры с определяющим значением морозного выветривания и механической (гравитационной) миграции химических элементов в зоне гипергенза. Для большей части участка гамма-спектрометрической съемки характерны условия, благоприятные для формирования вторичных геохимических ореолов открытого типа.

Обработка и интерпретация данных

Статистическая модель пространственной изменчивости радиоактивного фона создавалась с помощью кластерного анализа методом k-средних. Кластеризация осуществлена по стандартизированным значениям концентраций K и Th, высотных отметок и углов уклона дневной поверхности на точках измерения. В статистические расчеты не принимался U по следующим обстоятельствам. Среднее содержание U на площади исследования ниже 2 ppm. Эти значения находятся около предела разрешающей способности гамма-спектрометра и вклад погрешности определения в результаты измерений приобретает ощутимое влияние. Радиевый канал при кратковременном росте влажности почвы испытывает сильное приращение сигнала за счет энергий короткоживущих гамма-активных продуктов распада радона. Количество кластеров в квалификационной модели определялось аналогично примеру J. D. Weihermannetal [24] с использованием модели гауссовой смеси и байесовским информационным критерием. В итоге разделение осуществлено на шесть кластеров.По радиоактивной характеристике первый кластер – это кислые дайки, а также кварц-гидрослюдистые гидротермалиты. Отделение второго и третьего кластеров во многом происходит по геоморфологическим параметрам. В пространстве эти кластеры охватывают крутые склоны и их более выположенные нижние части без толстой моховой подушки. Вероятно, относительное обогащение радионуклидами присклоновых участков (второй кластер) связано с привносом глинистых частиц в результате их водного смыва с крутых склонов. По литологиче-

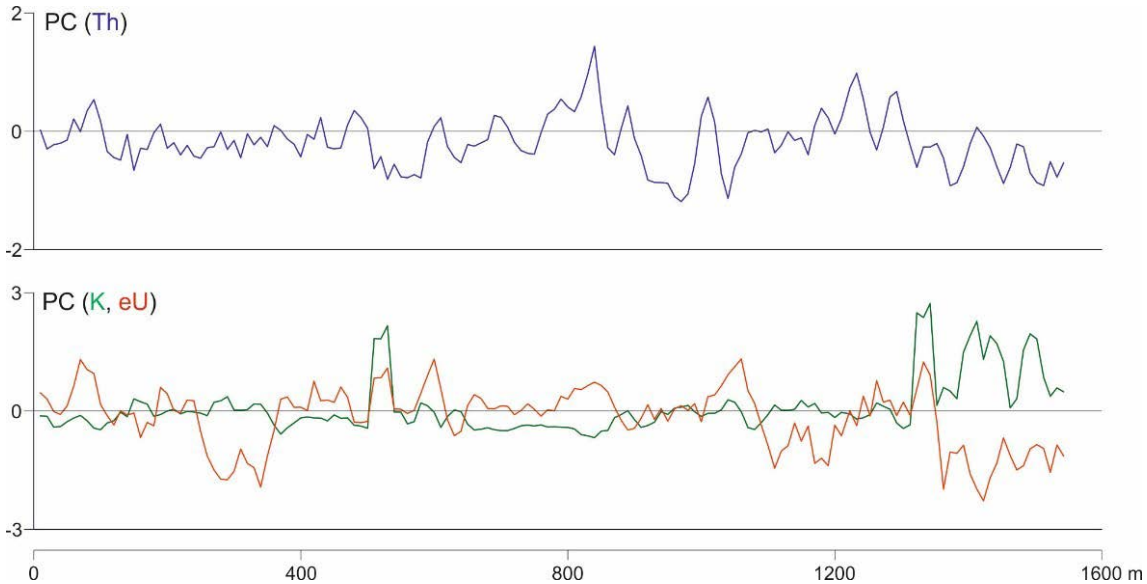


Рис. 2. Графики факторных значений главных компонентов (PC) по линии профиля

скому составу это преимущественно алевролиты и алевропесчаники. Четвертый, наиболее представительный кластер, объединяет точки измерений впределах разнозернистых песчаников водораздельного плато. Пятый и шестой кластер разделяет радиоактивность участков развития растительных экранов плоских поверхностей рельефа и крутых склонов ССВ экспозиции. Болота (шестой кластер) являются большим, чем склоновый мох препятствием для гамма-излучения горных пород.

Снижение доли дисперсии распределения ЕРЭ, связанной с изменчивостью литотипов пород и местных ландшафтов, осуществлялось переходом к анализу коэффициентов концентраций (КК) (рис. 1). Их расчет – это нормирование концентраций радионуклидов на соответствующие средние медианные в выборках кластеров. Использование медианы позволило «отсечь» влияние аргиллизитов на оценку среднего содержания ЕРЭ для точек первого кластера. После процедуры «выравнивая» коэффициенты вариации снизились на 6 %, 15 %, 7 % для K, eU и Th, соответственно. Интеграция стандартизированных данных KK–K, eU, Th, K/Th, eU/K, eU/Th осуществлялась РСА с вращением Varimax. При использовании коэффициентов концентраций произошли улучшения в структуре факторных нагрузок главных компонентов (РС) с позиции радиогеохимических моделей гидротермалитов. Первый главный компонент (РС (eU)) ореолами положительных факторных значений картирует области развития аргиллизитов (рис. 2). Они характеризуются ростом концентраций eU, при выносе K и увеличении значений eU/K, eU/Th. Второй главный компонент (РС (K)) через антагонизм K и Th, а также положительной корреляцией K с K/Th, eU/Th описывает продукты калиевого метасоматоза. Контрастные ореолы высокого факторноговлияния РС (K) впространстве хорошо дополняются низкими значениями РС (eU), что усиливает достоверность оконтуривания кварц-серицитовых гидротермалитов. Факторные значения РС (Th) – это смесь высокочастотных артефактов дисперсии Th в областях гидротермальных изменений и участках развития растительных экранов.

Литература

1. Богоявленский Л. Н. Радиометрическая разведка нефти // Известия Института прикладной геофизики ВСНХ СССР, 1927. – Вып. 3. – С. 113–123.
2. Гавшин В. М. Радиогеохимическая специфика осадочных бассейнов Западной и Средней Сибири // Геология и радиогеохимия Средней Сибири. – Новосибирск: Наука, 1985. – С. 173–192.
3. Некрасов А. И. Золото-медно-порфировое с серебром оруденениеЭндыбальскогосубвулкана, Западное Верхоянье // Руды и Металлы, 2009. – № 2. – С. 46–67.
4. Портнов А. М. Радиометрический поиск руды // Природа, 1984. – № 5. – С. 99–105.
5. Рихванов Л. П. Радиогеохимическая типизация рудно-магматических образований (на примере Алтае-Саянской складчатой области). – Новосибирск: Изд-во СО РАН «Гео», 2002. – 536 с.
6. Соболев И. С., Орехов А. Н., Соболева Н. П. Использование элементов многомерной статистики для обработки данных наземной гамма-спектрометрии при поисках гидротермальных месторождений золота // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018. – № 7 (329). – С. 104–115.
7. Смыслов А. А. Уран и торий в земной коре. – Л.: Недра, 1974. – 231 с.
8. Adams J. A. S., Weaver C. E. Thorium-to-uranium ratios as indicators of sedimentary processes – an example of geochemical facies // AAPG Bulletin, 1958. – № 42. – P. 387–430.
9. Adams J. A. S., Osmond J. K., Rogers J. J. W. The geochemistry of thorium and uranium / L. H. Ahrens et al. (Eds.), Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 3. – New York: Pergamon Press, 1959. – P. 398–448.
10. Davis J. D., Guilbert J. M. Distribution of the radioelements potassium, uranium and thorium selected porphyry copper deposits // Economic Geology, 1973. – № 2 (68). – P. 145–160.
11. de Lima R. P., Marfurt K. J. Principal component analysis and k-means analysis of airborne gamma-ray spectrometry surveys // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018. Society of Exploration Geophysicists, 2018. – P. 2277–2281.
12. Dickson B. L., Scott K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors // AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, 1997. – № 2 (17). – P. 187–200.
13. Duval J. S., 1976. Statistical interpretation of airborne gamma-ray spectrometric data using factor analysis // Exploration for uranium ore deposits. – Vienna: IAEA, 1976. – P. 71–79.
14. Galbraith J. H., Saunders D. F. Rock classification by characteristics of aerial gamma-ray measurements // Journal of Geochemistry Exploration, 1983. – № 18. – P. 49–3.
15. Gangadharam E. V., Kameswara Rao K., Aswathanarayana U. Distribution of radioactivity in the MosaboniCooper Mine, Bihar, India // Economic Geology, 1963. – № 4 (58). – P. 506–514.
16. Gross W. H. Radioactivity as a guide to ore // Economic Geology, 1952. – № 7 (47). – P. 722–742.

17. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. – Vienna: IAEA-TECDOC, 2003. – 173 p.
18. Moxham R. M., Foote R. S., Bunker C. M. Gamma – ray spectrometer studies of hydrothermal altered rocks // Economic Geology, 1965. – № 4 (60). – P. 653–671.
19. OstrovskiyE.Ya. Antagonism of radioactive elements in wallrock alterations fields and its in use in aerogamma spectrometric prospecting // International Geology Review, 1975. – № 4 (17). – P. 461–468.
20. Pires A. C. B, Carmelo A. C., Martins-Ferreira M. A. C. M., 2019. Statistical enhancement of airborne gamma-ray uranium anomalies: minimizing the lithological background contribution in mineral exploration // Journal of Geochemical Exploration, 2019. – V. 198. – P. 100–113.
21. Ranjbar H., Hassanzadeh H., Torabi M., Ilaghi O. Integration and analysis of airborne geophysical data of the Darrehas area, Kerman Province, Iran, using principal component analysis // Journal of Applied Geophysics, 2001. – № 4. – P. 33–1.
22. Saunders D. F., Burson K. R., Branch J. F. Integrated surface methods profiles, two East Texas fields // Association of Petroleum Geochemical Explorationists Bulletin, 1993. – V. 9. – P. 32–50.
23. Sikka D. B. Aero-gamma ray spectrometer aids in the detection of faults // Research Bulletin of the Panjab University, l962. – V. 13, Parts I–II. – P. 91–102.
24. Weihermann J. D., Ferreira M. P., de Casto L. G., Ferreira F. J. F., Silva F. M. Retrieving geological units with unsupervised clustering of gamma-ray spectrometry data // Journal of Applied Geophysics, 2021. – № 184. – P. 1–9.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ И РАДИОЦЕЗИЙ В ВЗВЕСИ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

В. Д. Страховенко

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН
Новосибирск, strahova@igm.nsc.ru

NATURAL RADIONUCLIDES AND RADIOCESIUM IN THE SUSPENSION AND BOTTOM SEDIMENTS OF LAKE ONEGO

V. D. Strakhovenko

V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branchofthe RAS
Novosibirsk, strahova@igm.nsc.ru

The natural variations of U, Th, K contents and Th/U, K/Th ratios andradiocesium in conjugate components of the system of Lake Onego (suspended matterand stratified sediment cores from different parts of lake)have been determined. These values change in different components within a wide range, with average Th/U ratios of 2.8–5.2.Comparison of the average content of elements in the stratified core of the bottom sediments and suspended matter (from the filters and sedimentation traps) from different parts of Lake Onego and the distribution of natural radionuclides do not reveal any significant differences and completely coincide with the contents in shield's crystalline rocks, siltstones and sandstones of Russian Platform Scale Composite .The overall ^{137}Cs pollution of bottom sediments of Lake onego is more thentwice highe to the global background.

Изучение поведения урана и тория и величины Th/U отношения в экзогенных процессах позволяет решать многие геохимические проблемы и оценивать радиационное состояние окружающей среды [10, 12]. Величина отношения Th к U, начиная от Солнечной системы в целом (Th/U = 3,72) магматических образований, находится в чрезвычайно узком интервале значений (2,5–5,5) при преобладании 3,5–4,5. Уран и торий, обычно в горных породах и минералах встречаются совместно, но значительно различаются по своим свойствам в условиях окружающей средыв силу того, что в экзогенных условиях U^{4+} переходит в U^{6+} [9]. Согласно многочисленным публикациям [2, 9–13 и др.] поведение тория определяется, главным образом, количеством и активностью областей сноса, распределение ^{40}K обусловлено соотношением в донных отложениях калия, заключенного в гидрослюдистых минералах и полевых шпатах. Уран, который наиболее подвижен и устойчив в водах в окислительных условиях поверхностных процессов относительно других радионуклидов, часто в восстановленных условиях образует горизонты с резким увеличением его концентраций [2, 4]. Согласно работам ряда авторов, химическое осаждение урана в процессе седиментогенеза связывают с его восстановлением ниже границы зоны кислородного насы-

щения [5, 8 и др.]. Но есть мнения, что подвижность форм урана определяется и биогеохимическими процессами и его взаимодействием с (гидр)оксидами железа и марганца [16].

Котловина Онежского озера расположена в зоне соприкосновения двух крупных геологических структур – Балтийского кристаллического щита и Русской плиты. Значительную часть котловины Онежского озера представляют раннедокембрийские образования Балтийского щита, сложенные на 80 % породами серии тоналит–трондьемит–гранодиорит (ТТГ) (серыми гнейсами). Южная часть котловины Онежского озера расположена среди венд-палеозойских пород платформенного чехла [1, 3]. На многих участках водосборного бассейна Онежского озера кристаллические породы покрыты чехлом четвертичных отложений (межледниковые, континентальные и морские образования раннего, среднего и позднего плейстоцена [7]. Водосборная площадь Онежского озера относится к территории с балансовым запасам урана около 3 тыс. тонн, согласно опубликованной карты распределения запасов урана России [7]. Согласно данным Чекулаева В. П. с соавторами, двуполевошпатовые граниты, которые широко пред¬ставлены на всей территории водосборной площади Онежского озера, характеризуются повышенным содержанием тория около 24 г/т [15]. Цель работы исследовать особенности распределения естественных радионуклидов (ЕРН) в составе осадочного вещества Онежского озера в его рассеянной форме, а затем и в концентрированной, т. е. в донных отложениях, определить основные источники их поступления в донный осадок и выявить специфику их минеральных форм.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования: взвесь из воды (на фильтры) и из седиментационных ловушек (СЛ), стратифицированные керны донных отложений из различных частей акваторииОнежского озера. Взвесь выделяли методом вакуумной фильтрации с использованием заранее взвешенных мембранных фильтров с диаметром пор 0,45 мкм (27 проб); осадочное вещество из СЛ выделялось методом прямой вакуумной мембранной ультрафильтрации с использованием ядерных фильтров с диаметром пор 0,45 мкм (24 пробы). Отобрано 69 кернов донных отложений мощностью до 3,2 м (1382 проб) и 2 керна глубиной до 12 м, и 5 кернов глубиной до 17 м с территории Приледникового Онежского. Донные отложения представлены позднеплейстоценовыми озерно-ледниковыми и голоценовыми озерными отложениями[19, 20].Проанализировано 27 проб верхнего окисленного слоя донных отложений (от 2 до 35 см), 14 проб железомарганцевых образований (ЖМК) из окисленного слоя, 32 проб пробы гомогенного алевро-пелитового слоя донных отложений (от 5 до 100 см), 27 проб ленточных глин (от 80 см до 15 м). Средние содержания радиоэлементов в компонентах Онежского озера определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT (FinniganMAT) с пневматическим концентрическим распылителем Майнхарда и методом прямой высокоразрешающей полупроводниковой гамма-спектрометрии с использованием колодезного HPGe детектора в аналитическом центре Института геологии и минералогии СО РАН. Этим же методом в донных осадках определялся ^{210}Pb по его низкоэнергетической гамма-линии 46,5 КэВ. Изучение морфологии, фазового и химического состава образцов, минералов носителей Th, U проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа «MIRA3 TESCAN», снабженного энергетическим спектрометром «OXFORD».Метод позволяет проводить количественный химический анализ в микрообъеме.

Результаты и обсуждение

В общем виде результаты исследований по ЕРНи радиоцезию в взвеси из воды (на фильтры), седиментационных ловушек (СЛ), и стратифицированных горизонтов кернов донных отложений (ДО) (окисленный слой, железо-марганцевых корок (ЖМК), гомогенные илы, ленточные глины) из различных частей акватории Онежского озера представлены в таблице 1. На представительном геохимическом материале устанавливается достаточное однообразие содержаний тория, урана, калия в осадочном материале СЛ и стратифицированных горизонтах кернов ДО из различных районов Онежского озера. Пониженные содержания ЕРНв взвеси на фильтрах и ЖМК связаны с разубоживанием взвеси биогенным кремнеземом скелетов диатомовых или, в случае ЖМК – гидро(оксидами) Fe, Mn. Анализ распределения Th/U-отношения (рисунок 1а), свидетельствует о достаточно узком диапазоне варьирования этой величины, для большинства стратиграфических подразделений ДО и взвеси не выходящим за пределы 2,5–4 для всех районов Онежского озера и типичного для горных пород его водосборной территории. Заметные отклонения от среднего значения Th/U выявлено только для всех ленточных глин, за исключением самых нижних слоев с шунгитовыми слойками и района Южного Онего, а также для гомогенных илов Повенецкого залива. Повышенные значения Th/U-отношения определяются высокими содержаниями тория в ленточных глинах и гомогенных илах Повенецкого залива, что возможно связано с ведущей ролью в их формировании не только кристаллических пород ТТГ-Водлозерского террейна, но и неоархейских двуполевошпатовых гранитов [1, 15]. Высокая корреляция между содержаниями Th и K означает их принадлежность к одному носителю – обломочному материалу в озерной системе (рисунок 1б). Обращает на себя внимание соответствие значений K/Th

Таблица 1. Средние содержания естественных радионуклидов и удельная активность ^{137}Cs в осадочном материале на фильтрах, седиментационных ловушках и донных отложениях из различных районов Онежского озера

Районы Онежского озера	Th, мг/кг	U, мг/кг	K, %	^{137}Cs, Mku/km^2
1	2	3	4	5
Осадочное вещество на фильтре				
Повенецкий залив	0,0047	0,0032	0,02	
Заонеж + М. Онего	0,006	0,0022	0,03	
Б. Онего + заливы	0,0038	0,0013	0,06	
Кондопожская губа	0,0267	0,0096	0,06	
Петрозаводский залив	0,0080	0,0028	0,07	
Центральное Онего	0,0023	0,0007	0,09	
Южное Онего	0,0040	0,0012	0,02	
Осадочное вещество седиментационных ловушек				
Повенецкий залив	7,6	3,0	1,80	
Заонеж + М. Онего	7,8	2,3	1,60	
Б. Онего + заливы	8,5	2,5	1,50	
Кондопожская губа	6,7	2,3	1,30	
Петрозаводский залив	7,3	2,2	1,65	
Южное Онего	8,3	2,4	1,70	
Донный осадок (окисленный слой)				
Повенецкий залив	8,8	2,8	2,10	52
Заонеж + М. Онего	8,5	2,6	1,75	112
Б. Онего + заливы	9,2	3,4	1,55	54
Кондопожская губа	7,8	2,7	1,49	76
Петрозаводский залив	6,1	1,6	1,38	82
Центральное Онего	8,5	2,5	1,47	51
Южное Онего	8,2	2,4	1,75	58
Донный осадок ЖМО				
Повенецкий залив	6,7	1,1	1,40	
Б. Онего + заливы	5,4	2,2	0,88	
Петрозаводский залив	7,4	0,2	0,92	
Центральное Онего	8,6	2,6	1,14	
Южное Онего	4,4	0,8	1,10	
Донный осадок (гомогенные илы)				
Повенецкий залив	9,4	1,9	2,05	56
Заонеж + М. Онего	9,6	2,5	1,82	258
Б. Онего + заливы	8,9	2,7	1,71	211
Кондопожская губа	6,6	3,1	1,73	169
Петрозаводский залив	6,1	3,3	1,76	175
Центральное Онего	10,5	3,0	1,88	238
Южное Онего	9,8	2,8	1,91	148

Окончание таблицы 1.

1	2	3	4	5
Донный осадок (ленточные глины)				
Повенецкий залив	12,9	2,7	2,31	
Заонеж + М. Онего	19,2	3,7	2,88	
Б. Онего + заливы	11,7	3,1	2,89	
Петрозаводский залив	14,9	3,6	2,67	
Центральное Онего	15,8	4,3	3,06	
Южное Онего	11,6	2,5	2,47	
Горные породы водосборной площади Онежского озера (по литературным данным)				
гранит AR-PR [7]	10,1	2,9	1,32	
ТТГ-Водлозерскоготеррейна Балтийского щита [1]	6,9	1,6	1,12	
неоархейскиегранодиориты [15]	24,2	н.о.	3,37	
Шунгиты [7]	0,1	2,9	0,27	
осадочно-вулканогенные [7]	1,3	0,3	1,12	
Русская плита(алевропесчаниках) [11]	8,5	2,1	2,15	
Русская плита(глинистые) [11]	11,5	3,8	3,23	
Балтийский щит [11]	10,1	2,9	2,38	

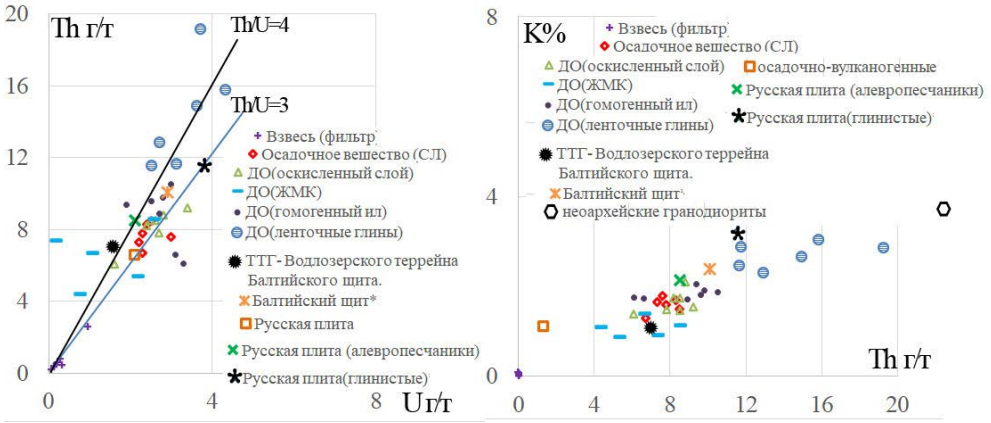


Рис. 1. Отношения Th/U и K/Th в осадочном материале на фильтрах, из седиментационных ловушек (СЛ) и из стратифицированных слоев донных отложений (ДО) (окисленный слой, ЖМК, гомогенный ил, ленточные глины) из разных районов Онежского озера, в сопоставлении с различными горными породами его водосборной площади (по литературным данным): граниты AR-PR и осадочно-вулканогенные [7]; ТТГ-Водлозерскоготеррейна [1]; кристаллические породы Балтийского щита и осадочные породы Русской плиты [11]; неоархейскиедвупо¬левошпатовые граниты [15]

отношений во всех компонентах Онежского озера кристаллическим горным породам балтийского щита и не большом дефиците калия относительно генетических типов осадочных пород Русской плиты.

Исходя из выше приведенного материала можно утверждать, что для естественных радионуклидов в основном преобладает механическая миграция в форме взвесей и обломочного материала.

Детальное изучение текстурно-структурных особенностей осадочного материала на фильтрах, из СЛ и ДО, морфологических особенностей минералов, химического состава и структурных данных на уровне отдельных зерен, сростков под микроскопом (оптический микроскоп Olympus BX50, увеличение 20–60 раз) и с использованием СЭМ (MIRA 3 TESCAN) показало, что его валовый минеральный состав из разных районов Онежского озера достаточно однообразен. На фоне тонкодисперсного материала (кварц, полевые шпаты, иллит, мусковит, хлорит, гидроокислы железа, биогенный детрит) пелитовой размерности выделяются крупные панцири диатомовых водорослей, а также крупные угловатые зерна, отдельные кристаллы тех же минералов, а также темноцветных и акцессорных минералов, таких как

актинолит, роговая обманка, диопсид, эпидот, титанит, магнетит, ильменит, циркон, рутил, апатит, монацит и др. В качестве изоморфной примеси торий и уран присутствуют в часто встречаемых монаците и цирконе (рисунок 2а, б).В составе монацита в компонентах Онежского озера преобладают La–Nd. Минералы монацит и циркон широко распространены в различных горных породах и в связи с устойчивостью к выветриванию могут образовывать россыпные скопления. Торий также встречается в редких зернах ксенотима (рисунок 2 в) и торита (рисунок 2 г). Зерна монацита, циркона, ксенотимаприсутствуют в составе осадочного материала на фильтрах и в СЛ и в составе ДО в ассоциации минералов титана (титанит, рутил, ильменит), слюд, скелетов диатомовых, хлоритов, иллита. Все эти зерна имеют природное происхождения, то есть накопление естественных радионуклидов, происходит в основном за счет зерен акцессорных торий, урансодержащих минералов, которые переносятся в водной среде в составе микроминеральной взвеси.

Распределение Th, K по глубине керна ДО Онежского озер довольно однородно на протяжении всего исследуемого временного интервала (около 300 лет) независимо от расположения по акватории озера (рисунок 3). Устанавливается достаточно однообразное распределение U в гомогенных иллах нижней частиразрезам ДО и значительные колебания на глубинах от 10 до 3 см, что скорее всего связано с поведением урана (U^{4+} переходит в U^{6+}), на окислительно-восстановительном барьере в присутствии Fe и Mn.

В целом современная радиационная обстановка от былых выпадений техногенных радионуклидов на территории России не представляет опасности для здоровья населения. В то же время в процессе исследования донных отложений Онежского озера по всей его акватории выявлено значительное превышение глобального фона для северных широт более чем в 3 раза. Для широтного пояса 50–60° с. ш. радиационный фон, обусловленный ^{137}Cs, варьирует в диапазоне 18–54 мКи/км^2 (0,4–2,0 кБк/м^2 в пересчете на 2012 г. [14]), к северу и югу от них значения уменьшаются [6]. В вертикальном распределении ^{137}Cs в ДО Онежского озера отчетливо наблюдаются один пик активности ^{137}Cs на глубине от 6 до 9 см донной залежи, а вверх и вниз по разрезу происходит затухание удельной активности радиоизотопа (рисунок 4а). Сопоставление графиков вертикального распределения концентрации ^{137}Cs и ^{210}Pb в разрезах ДО показало, что максимальные активности радиоцезия, приблизительно соответствуют датам, проведения мощных и сверхмощных воздушных взрывов в 1957–1962

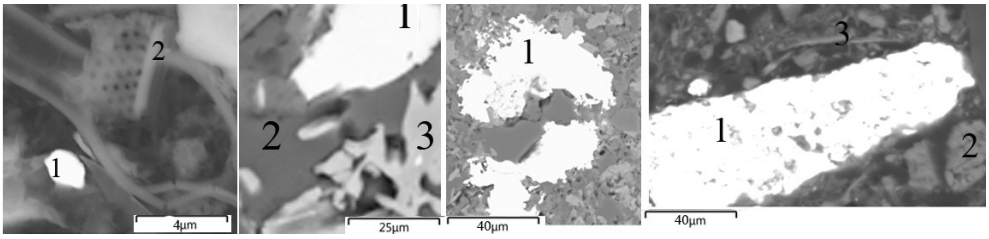


Рис. 2. Микрофотографии, выполненные с использованием СЭМ минералов тория и урана

а) – La–Nd монацит (1) с изоморфной примесью тория в ассоциации скелетов и обломков панцирей диатомовых (2) среди взвеси на фильтре Центрального Онего; б) – циркон (1) с изоморфной примесью урана в ассоциации с кварцем (2), рутилом (3) в гомогенных илах Большого Онего; в) – ксенотим (1) с изоморфной примесью тория в ассоциации с обломками панцирей диатомовых и минералов: кварц, альбит, мусковит, хлорит, иллит, кпш, титанит, рутил, ильменит в осадочном материале СЛ Малого Онего; г) – торит (1) в ассоциации с полевыми шпатами (олигоклаз (2), кпш), мусковитом (3), хлоритом, иллитом, кварцем в гомогенных илах Кондопожской губы.

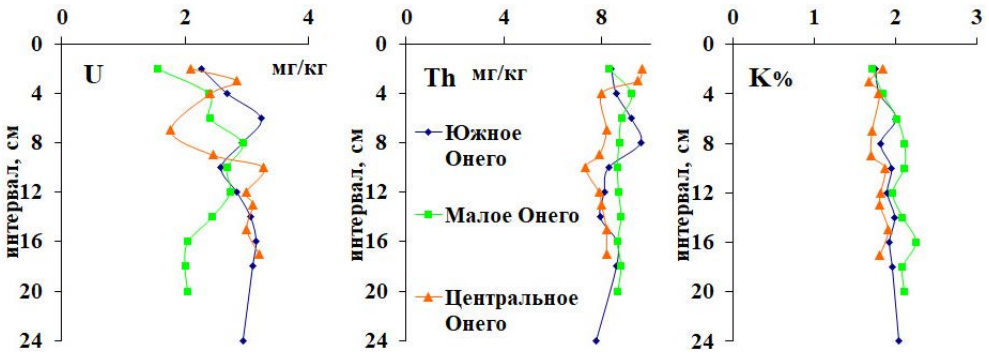


Рис. 3. Вертикальное распределение усредненных содержаний U (мг/кг), Th (мг/кг), K (%) в разрезах голоценовых донных отложений (окисленный ил (0–2 см), гомогенный ил (2–24 см)) из различных районов Онежского озера

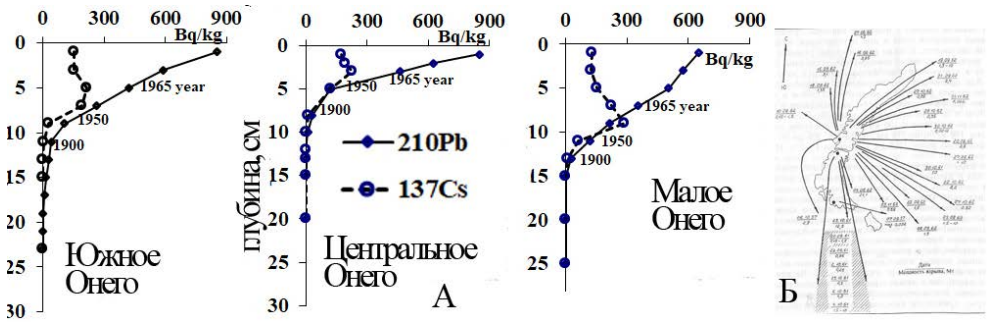


Рис. 4. (А) Вертикальное распределение удельных активностей ^{137}Cs (Бк/кг) и ^{210}Pb (Бк/кг) в разрезах голоценовых донных отложений (окисленный ил (0–2 см), гомогенный ил (2–24 см)) из различных районов Онежского озера и (Б) Следы распространения радиоактивного загрязнения испытаний ядерного оружия на Новоземельском полигоне (по данным [6])

годах на территории полигона на архипелаге Новая Земля, в том числе в 1961 году – супербомбе. Согласно карте распространения облаков радиоактивного загрязнения от взрывов, в 1961 году роза ветров направлена в сторону Европейской территории СССР (рисунок 4б) [6].

Обобщая полученные результаты по распределению ЕРН в компонентах озерной системы можно утверждать, что концентрации ЕРН в взвеси и ДО Онежского озера наследуют радиогеохимические особенности горных пород областей сноса. Пониженные содержания ЕРН во взвеси связаны с разубоживанием исследуемых компонентбиогенным кремнеземом (скелеты диатомовых). Вариации значений активностей ЕРН донных осадков между различными районами озера и по глубине керна весьма незначительны. Выявленные вариации распределение урана в верхней части керна донных отложений, скорее всего связаны с диагенетическим перераспределением урана в присутствии повышенных содержаний Fe и Mn.

Акцессорные минералы обломочной фракции (монацит, циркон и ксенотим) играют ведущую роль в накопление естественных радионуклидов в различных компонентах озерной системы, которые переносятся в водной среде в составе микроминеральной взвеси.

Несомненно, высокиеактивности ^{137}Cs в глубинных интервалах (6–10 см) являются свидетельством первоначального загрязнения донных осадков от ядерных взрывов, произведенных на полигоне архипелага Новая Земля.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ проекта № 19-05-50014.

Литература

1. Арестова Н. А., В. П. Чекулаев, С. Б. Лобач-Жученко, Г. А. Кучеровский Формирование архейской коры древнего Водлозерского домена, Балтийский щит стратиграфия // Геологическая корреляция, 2015. – Т. 23 (2). – С. 3–16.
2. Гавшин В. М., Архипов С. А., Бобров В. А., Мельгунов М. С., Макарова И. В., Сухоруков Ф. В., Степин А. С., Хлыстов О. М., Киреев А .Д., Будашкина В. В. Распределение естественных радиоактивных элементов в голоцен плейстоценовых глубоководных отложениях озера Байкал и хронологические построения // Геология и геофизика, 1998. – Т. 39. – № 8. – С. 1045–1058.
3. Государственная геологическая карта РФ масштаба 1 : 200000. Издание второе. Серия Карельская. Лист P–36–XII (Медвежьегорск). Объяснительная записка. – СПб., ВСЕГЕИ, 2013. – 304 с.
4. Гранина Л. З. Ранний диагенез донных осадков озера Байкал. – Новосибриск: ГЕО, 2008. – 160 с.
5. Евсеева Л. С., Перельман А. И., Иванов К. Е. Геохимия урана в зоне гипергенеза. – М.: Атомиздат, 1975. – 280 с.
6. Израэль Ю. А. (2005) Антропогенное радиоактивное загрязнение планеты Земля // Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий: Материалы международной конференции. – Москва, изд-во Гидромет. – 13–24.
7. Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения). – Петрозаводск, КНЦ РАН, 2011. – 431 с.
8. Основные черты геохимии урана / Ред. А. П. Виноградов. – Томск, Изд-во STT, 2013. – 374 с.
9. Рихванов Л. П. Использование радиоактивных элементов и отношения Th/U при изучении геохимической типизации гранитоидов и степени их соответствия интрузивным образованиям //Геология и геофизика, 2019. – Т. 60. – № 9. – С. 1281–1291.
10. Рихванов Л. П. Радиоактивность и радиоактивные элементы как фактор геологической среды и его использование в науках о земле // Разведка и охрана недр, 2017. – № 12. – С. 55–61.
11. Ронов А. Б., Мигдисов А. А. Количественные закономерности строения и состава осадочных толщ Восточно Европейской платформы и Рус-

ской плиты и их место в ряду древних платформ мира // Литология и полез. Ископаемые, 1996. – № 5. – С. 451–475.
12. Смыслов А. А. Уран и торий в земной коре. – Л., Недра, 1974. – 231 с.
13. Титаева Н. А. Ядерная геохимия: Учебник. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 336 с.
14. Усачева А. А., И. Н. Семенков ^{137}Cs в растениях и почвах таежных и тундровых ландшафтов Западной и Средней Сибири // Геохимия ландшафтов. К 100-летию со дня рождения Александра Ильича Перельмана. – АПР Москва, 2017. – С. 498–521.
15. Чекулаев В. П., Арестова Н. А., Егорова Ю. С. Неоархейские граниты Карель¬ской провинции: геологическое положение, геохимия, происхождение // Региональная геология и металлогения, 2020. – № 81. – С. 27–44.
16. Fredrickson J. K., Zachara J. M., Kennedy D. W., LIU C., DUFF M. C., HUNTER D. B., DOHNALKOVA A. Influence of Mn oxides on the reduction of uranium (VI) by the metal-reducing bacterium Shewanellaputrefaciens // Geochim. Cosmochim. Acta, 2002. – 66 (18). – P. 3247–3262.
17. Gavshin V. M., Shcherbov N. L., Mel'gunov M. S., Strakhovenko V. D., Bobrov V. A., Tsibul'chik V. M., 1999. ^{137}Cs and ^{210}Pb in lacustrine sediments of Stepnoi Altai as indicators of the dynamics of man-induced changes in geochemical background throughout the 20th century. GeologiyaiGeofizika (Russian Geology and Geophysics) 40 (9), 1331–1341 (1308–1319).
18. Malikova I. N., Strakhovenko V. D. The effect of landcape factors on natural radioactivity of soils in Siberia // International Journal of Environmental Research, 2017. – 11 (5). – P. 653–665. https:doi.org/10.1007/s41742-017-0057-8.
19. Saarnisto M., Saarinen T. Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the lake Onega basin to the Salpausselkya End Moraine // Global and Planetary Changes, 31. 2001. – (31). – P. 333–405.
20. Strakhovenko V. D., Subetto D., Ovdina E. A., Danilenko I. V., Belkina N., Efremenko N., Maslov A. Mineralogical and geochemical composition of Late Holocene bottom sediments of Lake Onego // Journal of Great Lakes Research, 2020. – (46). – P. 443–455.

ЕСТЕСТВЕННЫЙ РАДИАЦИОННЫЙ ФОН ТЕРРИТОРИИ ЧЕЛЯБИНСКОГО ГОРОДСКОГО БОРА

А. А. Сутягин

Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет
Челябинск, Россия, sandrey0507@mail.ru

NATURAL RADIATION BACKGROUND OF THE TERRITORY OF CHELYABINSK CITY BOR

A. A. Sutyagin

South Ural state humanitarian pedagogical university
Chelyabinsk, Russia, sandrey0507@mail.ru

The article discusses the current radiological state in the territory of the Chelyabinsk city pine forest. The values of the modern background radiation are shown, which are assessed as satisfactory. The values of the specific activity of natural radionuclides potassium-40, radium-226, and thorium-232 have been established. It is shown that certain values do not exceed the standard values for building granites.

Территория Уральского региона является зоной аномально высокого радиационного фона, формирующегося не только в результате техногенного воздействия, но и за счет вклада естественной радиации. Для Челябинской области это объясняется существованием аномалии природной радиоактивной минерализации литосферы и гидросферы, что обуславливает повышенное содержание природных радионуклидов, например, радона, в отдельных компонентах окружающей среды.

Челябинский городской бор, выступающий как зона отдыха жителей города, расположен на территории выхода гранитных пород, выступающих в качестве определяющего фактора естественного радиационного фона. Многочисленные карьеры, оставшиеся после выработки гранита как строительного материала, могут выступать источниками воздействия естественной радиации на человека.

Исследование радиационного состояния почв Челябинского городского бора позволяет конкрети-

зировать знания об источниках поступления естественных радионуклидов в окружающей среде, получать практическую информацию для проведения мероприятий по благоустройству территории бора, для выбора мест организации культурного отдыха населения с соблюдением требований безопасности человека и здровьесбережения.

Пробы почв для выполнения радиологического анализа отбирались в летне-осенний период с точек при входе в Челябинский городской бор, возле железнодорожной станции Солнечная вблизи г. Монахи и вблизи поселка Шершнёвские каменные карьеры. Радиационный фон в этих точках, измереный при помощи дозиметра-радиометра МКС-05 «ТЕРРА», составлял, соответственно, 16 мкР/ч, 33 мкР/ч и 14 мкР/ч [1].

Измерение удельной активности естественных радионуклидов проводилось на сцинтилляционных гамма-спектрометрах с использованием программного обеспечения «SpectraLine» методом эталонных спектров (энергетических окон).

По данным Челябинского ЦГМС радиационная обстановка в Челябинском городском бору незначительно превышает средние значения по Челябинску и Челябинской области, (11–13 мкР/ч) [3]. Превышения фоновых значений наблюдаются в северо-западной части бора в районе горы Монахи (до 33 мкР/ч), что может быть обусловлено выходом на поверхность эманирующих подстилающих гранитных пород. Помимо естественных выходов они обнажаются в результате водной и ветровой эрозии, а также смыва почвы на склоны. Минимальные значения радиационного фона в 10–12 мкР/ч наблюдаются в северо-восточной части бора вблизи зоопарка, где дорожки асфальтированы, а выходов горных пород на поверхность не наблюдается. Некоторое превышение среднего фонового значения в северо-восточной части бора вблизи лесной тропы, наиболее вероятно, обусловлено развитием оврага – в результате эрозии почвы обнажается материнская порода.

Безопасным считается уровень радиации до величины, приблизительно 0,5 мкЗв/ч (до 50 мкР/ч). Таким образом, радиационный фон Челябинского городского бора можно считать допустимым и безопасным, а превышения средних значений фона по Челябинской области, вполне вероятно, может быть обусловлено выходами на поверхность эманирующих горных пород [2].

Данные, полученные при определении удельной активности некоторых природных радионуклидов в исследованных точках, приведены в таблице 1.

Результаты определений показывают, что основным радионуклидом, обуславливающим естественный радиационный фон в исследуемых точках, является калий-40. Максимальным значением удельной активности радионуклида характеризуется первая точка отбора (ж/д станция Солнечная), при этом данная величина в 1,4 раза превышает нормативные значения для строительных гранитов. В остальных точках калий-40 также является преобладающим радионуклидом, но его значения не превышают нормативов. Следует также отметить, что для точек 2 и 3, расположенных примерно в одной части бора, значения удельной активности калия-40 достаточно близки. Это может быть обусловлено достаточно высокой распространённостью в земной коре.

Удельная активность радия-226 так же имеет большие значения на первой точке отбора. В то же время, для всех исследуемых почв удельная активность радионуклида имеет достаточно близкие значения, что можно объяснить равномерным распространением гранита в почвах по всей территории парка.

Удельная активность тория-232 наибольшая на второй точке отбора проб (вход в городской бор), при этом, активность радионуклида при перемещении вглубь территории бора уменьшается, и наименьшим значением характеризуется точка у Монахов. В данном случае наблюдается некоторое отклонение от общих правил: считается, что активность тория, входящего в состав слюды, как породообразующего минерала гранита обычно возрастает при увеличении количества калия. В данном же случае наблюдается обратная ситуация: по мере возрастания удельной активности калия – 40 удельная активность тория падает.

Значения удельной активности радия-226 и тория-232 не превышают нормативных значений для строительных гранитов (130 Бк/кг и 140 Бк/кг соответственно). Обычно среднее содержание радия-226 и тория-232 в земной коре и горных породах довольно невелико, и значения удельной активности данных элементов на территории исследования вполне подтверждают этот факт.

Наличие калия-40 и тория-232 также можно связать с деятельностью ТЭЦ. Ранее, до использования природного газа, в качестве сырья применялся ка-

Таблица 1. Удельная активность природных радионуклидов в почвах Челябинского городского бора

Место отбора пробы	Активность, Бк/кг			
	K-40	Ra-226	Th-232	Cs-137
Ж/д ст. Солнечная, Монахи	1120 ± 18 %	52 ± 18 %	< 19	11,6 ± 19 %
Вход в ЧГБ	760 ± 19 %	39 ± 16 %	< 73	30 ± 19 %
Пос. Шершнёвские каменные карьеры	680 ± 19 %	42 ± 13 %	< 54	16 ± 22 %

менный уголь, который содержит в себе естественные радиоактивные элементы. С этим фактом может быть связано и содержание в почве цезия-137, проявляющего наибольшую активность так же в точке отбора проб при входе в бор. Данный радионуклид может иметь естественное происхождение, входя в состав горных пород, в частности гранитов, и проведённое исследование показывает, что его удельная активность соответствует фоновым значениям. Более высокое значение при входе в бор может быть так же связано с техногенным воздействием, которому данная территория подвергается в большей степени, чем другие две точки отбора проб, более удалённые и находящиеся в лесной зоне. Можно предположить, что наличие цезия-137 также связано с аэральными выбросами при сжигании каменного угля, использовавшегося в качестве топлива на ТЭЦ.

По полученным данным проведен расчет удельной эффективной активности естественных радионуклидов, которая определяется по формуле (1):

$$A_{эфф} = ARa + 1{,}31\,ATh + 0{,}085\,AK \quad (1),$$

где *ARa* – удельная активность радия-226, находящаяся в равновесии с остальными членами уранового и ториевого естественных рядов; *ATh* – удельная активность тория-232, находящаяся в равновесии с остальными членами уранового и ториевого естественных рядов; *AK* – удельная активность калия-40.

Удельная эффективная активность естественных радионуклидов для первой точки отбора проб почвы составляет 172,09 Бк/кг; для второй – 199,23 Бк/кг; для третьей – 170,54 Бк/кг, что не превышает значений средней удельной эффективной активности данных естественных радионуклидов в гранитах (381 Бк/кг).

Таким образом, основным радионуклидом, вносящим вклад в формирование естественного радиационного фона Челябинского городского бора выступает калий-40, максимум удельной активности которого наблюдается в зоне Монахов. Определенные значения радия-226, тория-232 и цезия-137 не превышают нормативных значений для строительных гранитов.

Установленные распределения удельных активностей естественных радионуклидов в почвах бора соотносятся с изменением радиационного фона исследуемых территорий, который в целом может считаться допустимым и безопасным.

Литература

1. Вишневецкий А. Л. Пути совершенствования методики измерения мощности эквивалентной дозы дозиметром МКС-05 «Терра» при радиометрическом контроле поверхности грунта / А. Л. Вишневецкий, С. В. Минка, И. И. Попов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, 2016. – № 72. – С. 162–168.
2. Ляндзберг Р. А. Составляющие естественного радиационного фона / Р. А. Ляндзберг // Вестник Камчатского государственного технического университета, 2006. – № 5. – С. 21–22.
3. Тараборин Д. Г. Оценка состояния радиационной обстановки горнорудных районов Южного Урала и основы районирования территории по степени радиационной опасности / Д. Г. Тараборин // Вестник Оренбургского государственного университета, 2005. – № 5 (43). – С. 107–111.

ОЦЕНКА ОБЪЕМОВ УРАНА И ТОРИЯ, ВЫНОСИМОГО ДРЕНАЖНЫМИ ВОДАМИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГРАНИТНОГО КАРЬЕРА «БОРОК» (г. НОВОСИБИРСК)

А. Ф. Сухорукова[1], Д. А. Новиков[1], А. А. Черкасов[2], А. С. Деркачев[1], А. А. Максимова[1]

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН
Новосибирск, Россия, SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru
[2]ООО «Горно-добывающая компания»
Новосибирск, Россия, Borok16@mail.ru

EVALUATION OF THE AMOUNTS OF URANIUM AND THORIUM CARRIED OUT WITH DRAINAGE WATERS DURING THE DEVELOPMENT OF THE BOROK GRANITE QUARRY (NOVOSIBIRSK)

A. F. Sukhorukova[1], D. A. Novikov[1], A. A. Cherkasov[2], A. S. Derkachev[1], A. A. Maksimova[1]

[1]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS
Novosibirsk, Russia, SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru
[2]Ltd "Mining Company"
Novosibirsk, Russia, Borok16@mail.ru

Results of the studies of ^{238}U, ^{232}Th and ^{222}Rn distribution in the drainage waters of the Borok granite quarry, the oldest one among those in operation at present in Russia, are described. Water composition was determined to be mainly $Cl–SO_4–HCO_3$ Na–Mg–Ca and $SO_4–HCO_3$ Na–Mg–Ca with TDS 572 – 697 mg/dm^3, corresponding to the conditions of oxidative geochemical setting. The hydrogeological structure of the quarry is rather complicated, and its development is impossible without permanent exhaustion of incoming waters (2.24–2.35 mln m3 per year); waters are permanently discharged into the Inya river. The concentrations of natural radionuclides are (mg/dm^3): ^{238}U ($9.30 \cdot 10^{-3}$ – 0.21), ^{232}Th ($1.00 \cdot 10^{-6}$ – $9.62 \cdot 10^{-5}$). The activity of radon (^{222}Rn) varies within the range 1 to 89 Bq/dm^3. Expert evaluation of radionuclide distribution in drainage waters provides evidence of the annual outflow of uranium up to 151 kg and thorium up to 61 kg.

Введение

Содержание радионуклидов в гидросфере Земли варьирует в широких пределах. К настоящему времени в науке сформировалось множество направлений так или иначе связанных с изучением радиоактивности вод: 1) исследование содержаний радиоактивных элементов; 2) оценка радиологической опасности питьевых и минеральных вод; 3) бальнеологические свойства радиоактивных элементов; 4) влияние геохимических параметров среды на формы миграции и нахождения радионуклидов в водных средах; 5) оценка возраста подземных вод; 6) роль процессов взаимодействия в системе вода – горная порода при формировании месторождений радиоактивных элементов; 7) синтез новых радиоактивных минералов; 8) исследования по радиоактивному загрязнению гидросферы; 9) изучение сорбирующих свойств материалов для очистки вод от радиоактивного загрязнения; 10) биоаккумуляция радиоактивных элементов и многие другие.

Радиоактивному загрязнению вод и грунтов разрабатываемых месторождений полезных ископаемых посвящено множество работ, из последних исследований необходимо отметить следующие [3, 5, 7, 15–19, 24].

В пределах Новосибирской городской агломерации и в ее окрестностях в настоящее время разрабатывается несколько гранитных карьеров разной степени обводненности – Борок, Мочище, Скала и Новобибеево. Известны затопленные карьеры, которые в настоящее время используются в городском хозяйстве в рекреационных целях – Горский и Тулинский. Несмотря на длительное время их эксплуатации до настоящего времени практически не проводились исследования химического состава дренажных вод, в том числе распределения в них радионуклидов. Результаты исследований по природным водам города Новосибирска и их радионуклидному составу приведены в работах В. К. Гусева, Е. К. Вериго, Д. А. Новикова, А. Ф. Сухоруковой и др. [2, 4, 6, 8–15, 20–23].

Карьер Борок расположен в южной части Октябрьского района г. Новосибирска на правом берегу р. Иня в 500 м выше ее устья (рис. 1). Гранитный массив, в пределах которого расположен карьер, в начале разработки представлял собой останец овальной формы, вытянутый вдоль реки Иня и возвышающийся над поверхностью. Карьер заложен в холме древнего острова р. Обь с сосновым бором в 1908 году в связи с активным развитием города (тогда еще Новониколаевска) и строительством транссибирской железнодорожной магистрали, хотя кустарная разработка

гранитов началась еще в конце 19 века. Дренажные воды карьера сбрасываются в реку Иня, являющуюся правым притоком Оби, из которой осуществляется водоснабжение двухмиллионного Новосибирска. В непосредственной близости от места впадения Ини в реку Обь расположена крупнейшая Насосно-фильтровальная станция (НФС-1). В этой связи возникает вопрос об объемах, выносимых дренажными водами карьера Борок радионуклидов.

Материалы и методы

В рамках настоящих исследований были обобщены материалы ООО «Горно-добывающая компания» по водопритокам в карьер Борок и составлена электронная база данных общим объемом более 1500 записей. Вовремя полевых сезонов 2019–2020 годов было отобрано и проанализировано 17 проб воды. Непосредственно на объектах выполнено определение быстроизменяющихся параметров: pH, Eh, температуры, содержания растворенного O_2, с помощью оборудования (Hanna HI9125, кислородомер АКПМ-1-02Л) и полевой гидрогеохимической лаборатории. Радиационный фон в точках отбора проб определялся при помощи дозиметра ДКГ-07Д «Дрозд». Лабораторное изучение их химического состава проводилось методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ.

Результаты и их обсуждение

Месторождение приурочено к юго-восточному контакту Новосибирского верхнепалеозойского массива гранитоидов ($\varepsilon\gamma P_3 - T_1 p_2$) с песчано-глинистыми сланцами пачинской свиты верхнего девона ($D_3 pč$), которые в результате контактового метаморфизма превращены в роговики [1]. Гранитоиды и роговики пронизаны многочисленными дайками кислого состава, реже дайками лампрофиров.

В процессе разведки и эксплуатации месторождения был выполнен крайне малый объем гидрогеологических исследований. Его первая гидрогео-

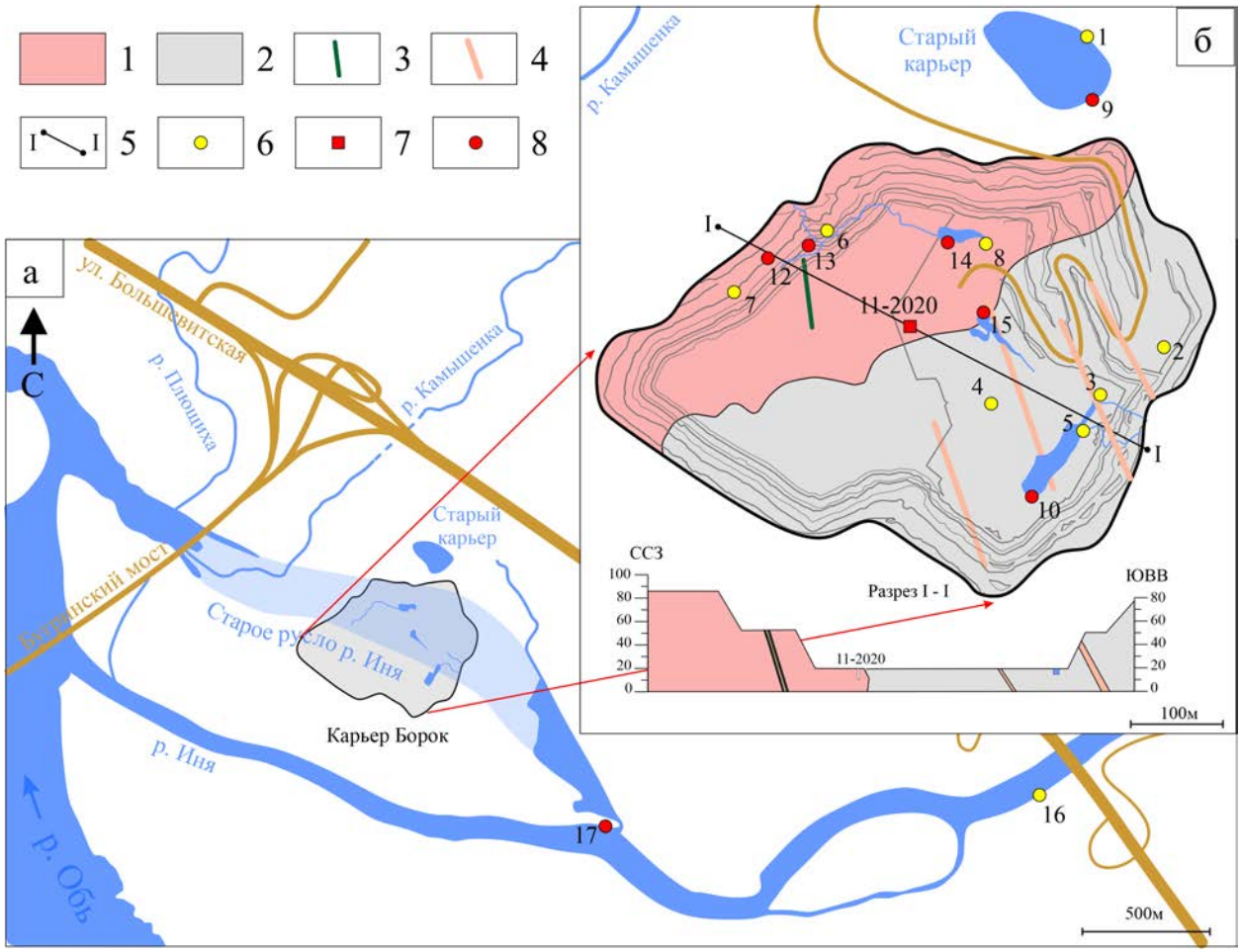


Рис. 1. Местоположение карьера Борок (а) и схема геологического строения (б)

1 – гранитоиды; 2 – роговики; 3 – лампрофиры; 4 – гранодиориты; 5 – линия разреза; 6 – точки отбора проб 1–8, 16 (2019 год): 1 – старый карьер (северная часть), 2 – источник I, 3 – источник II, 4 – зумпф I, 5 – источник III, 6 – источник IV, 7 – источник V, 8 – зумпф II, 16 – река Иня; 7 – точки отбора проб 9–15 (2020 год): 9 – старый карьер (восточная часть), 10 – источник VI, 11 – скважина I, 12 – источник VII, 13 – источник VIII, 14 – зумпф III, 15 – зумпф IV, 17 – река Иня.

логическая характеристика была дана в 1955 году А. С. Полиновским, Г. В. Баландиным. Дальнейшие исследования 70–80-х годов прошлого века связаны с именами геологов и гидрогеологов Новосибирской геологопоисковой экспедиции (А. В. Павлов, В. И. Грязнова, Г. Т. Голодняк, В. Н. Лукьяшко, Л. Е. Ударцева, Г.Ф. Вавилихин и других). Анализ имеющихся фондовых материалов показал, что ранее радионуклидный состав дренажных вод карьера практически не изучался. Так, имеются сведения лишь о распределении урана в обобщениях за 1976 и 1983 года, в которых отмечаются его концентрации в интервале от $1{,}8 \cdot 10^{-4}$ до 0,21 мг/дм^3. Необходимо отметить, что радиационный фон закономерно повышается в той части карьера, где вскрыты гранитоиды, достигая максимального значения 50 мкР/ч, на юго-западе в области распространения роговиков среднее значение составляет 21 мкР/ч, а за пределами карьера на берегах реки Иня не более 12 мкР/ч.

В пределах исследуемого объекта развит водоносный горизонт аллювиальных четвертичных отложений, представленный супесями, суглинками и песчано-гравийно-галечниковыми отложениями и водоносный горизонт палеозойских интрузивов, который представлен в основном гранитами, в меньшем объеме аплитами, гранит-порфиритами и роговиками. Воды нижнего горизонта – трещинно-жильные, напорные. По результатам опытных откачек прошлых лет палеозойские образования характеризуются невысокой водообильностью со средним удельным дебитом скважин 0,02 л/с. Средние величины коэффициента фильтрации составляют 1,4 м/сут, а коэффициента водопроводимости не более 1 м^2/сут. Питание осуществляется посредством межпластовых перетоков из вышезалегающего четвертичного горизонта, атмосферными осадками и дренажа из реки Иня. Для оценки количества выносимого дренажными водами карьера урана и тория наибольший интерес представляют трещинно-жильные воды гранитов. В течение двух полевых сезонов были опробованы все выходы подземных вод на территории карьера: старый карьер, который служит, в настоящее время, местом сбора вод, зумпфы глубиной от 3 до 5 метров, источники (выходы вод в виде водопадов) смешанного происхождения из бортов карьера, скважины глубиной 11 м, пройденной для взрывных работ.

С первых лет эксплуатации карьера существует необходимость постоянных откачек воды. В послевоенном 1947 году работа карьера была приостановлена, и он был полностью затоплен. В настоящее время объем карьера оценивается в 17,7 млн м^3. Основной водоотлив в карьере организован на горизонте с абсолютной отметкой +50,0 м – водоем для сбора вод расположен в котловане старого карьера северной части отработки. Для откачки воды из главного водоема организован водоотлив с использованием трех насосных установок типа 300Д70 производительностью 1080 м^3/час и автоматической системой учета. Начиная с 1950-х годов предпринимались попытки оценить объемы вод, поступающих в карьер, и роль поверхностного и подземного стока. Фиксированного учета откачиваемых объемов дренажных вод не велось вплоть до 2019 года, и реальные замеры показали цифры 2,2–2,3 млн м^3 в год.

Рассмотрим особенности дренажных вод карьера Борок и речных. Первые характеризуются большим разнообразием химического состава вод с преобладанием $Cl–SO_4–HCO_3$ Na–Mg–Ca и $SO_4–HCO_3$ Na–Mg–Ca типов с величиной общей минерализации от 572 до 697 мг/дм^3 и содержанием кремния от 0,89 до 10,53 мг/дм^3. Параметры среды отвечают окислительной геохимической обстановке с величинами pH от 7,6 до 8,5; Eh от +150,2 до +261,0 мВ и $O_{2раств.}$ от 3,4 до 11,4 мг/дм^3. Воды реки Иня отличаются $SO_4–HCO_3$ Mg–Ca–Na и $SO_4–HCO_3$ Mg–Na составом с величиной общей минерализации 286–576 мг/дм^3 и содержанием кремния 0,14–1,94 мг/дм^3. Параметры среды также отвечают окислительной обстановке с величинами pH 8,5–8,6; Eh +165,6 – +235,0 мВ и $O_{2раств.}$ 7,6–13,8 мг/дм^3. Состав речных вод свидетельствует об активном накоплении в водах натрия (до 78,7 мг/дм^3) за счет процессов их антропогенного загрязнения в черте города.

Содержания радионуклидов в дренажных водах составляют (мг/дм^3): ^{238}U от $9{,}30 \cdot 10^{-3}$ до 0,21 и ^{232}Th от $1{,}00 \cdot 10^{-6}$ до $9{,}62 \cdot 10^{-5}$ (табл. 1, рис. 2). $^{232}Th/^{238}U$ отношение в водах изменяется в интервале от $9{,}71 \cdot 10^{-5}$ до $1{,}49 \cdot 10^{-3}$, при среднем $5{,}07 \cdot 10^{-4}$. Активность радона варьирует в пределах от 1 до 89 Бк/дм^3. При выполненных ранее в 70–80-е года прошлого века единичных замерах, концентрации радона в водах четвертичных отложений не превышали 10–15, а в трещинно-жильных водах верхнепалеозойских гранитов варьировали в диапазоне от 30 до 140 Бк/дм^3. При этом содержания ^{238}U составляли $1{,}80 \cdot 10^{-4} – 7{,}8 \cdot 10^{-3}$ мг/дм^3 в водах четвертичных отложений и $9{,}30 \cdot 10^{-3} – 0{,}21$ мг/дм^3 в трещинно-жильных водах гранитоидов. Данные по распределению тория получены впервые. Активность радона в речных водах не превышает 2 Бк/дм^3. Что касается содержания радионуклидов, то концентрация урана практически одинакова в водах реки выше и ниже по течению от места сбора карьерных вод, а тория на порядок выше. $^{232}Th/^{238}U$ отношение меняется от $1{,}32 \cdot 10^{-3}$ (точка отбора воды выше по течению от места сбора карьерных вод) до $5{,}79 \cdot 10^{-3}$ (ниже по течению).

Результаты автоматического учета дренажных вод и актуальные данные по их химическому составу позволили впервые выполнить экспертную оценку объемов выносимых ими природных радионуклидов. Так, средние объемы дренажных вод составляют – 2,3 млн м^3 в год, а концентрации урана – $6{,}58 \cdot 10^{-2}$

Таблица 1. Радионуклидный состав дренажных вод карьера Борок и реки Иня

№ на рис. 1	Радиационный фон, мкР/ч	pH	Eh, мВ	$O_{2раств.}$, мг/дм³	^{222}Rn, Бк/дм³	Th, мг/дм³	U, мг/дм³	Th/U
1	17	8,3	261,0	9,30	17	$5{,}10 \cdot 10^{-5}$	$9{,}26 \cdot 10^{-2}$	$5{,}51 \cdot 10^{-4}$
2	16	8,1	225,0	10,58	19	$1{,}24 \cdot 10^{-5}$	$1{,}08 \cdot 10^{-2}$	$1{,}15 \cdot 10^{-3}$
3	18	8,3	256,3	10,90	4	$9{,}90 \cdot 10^{-6}$	$8{,}00 \cdot 10^{-2}$	$1{,}24 \cdot 10^{-4}$
4	20	8,0	233,0	9,61	12	$1{,}20 \cdot 10^{-5}$	$3{,}76 \cdot 10^{-2}$	$3{,}19 \cdot 10^{-4}$
5	18	8,3	246,5	11,21	1	$5{,}40 \cdot 10^{-6}$	$2{,}96 \cdot 10^{-2}$	$1{,}82 \cdot 10^{-4}$
6	22	8,3	244,7	11,43	8	$6{,}50 \cdot 10^{-6}$	$9{,}30 \cdot 10^{-3}$	$6{,}99 \cdot 10^{-4}$
7	28	8,5	215,8	11,10	16	$1{,}00 \cdot 10^{-6}$	$1{,}03 \cdot 10^{-2}$	$9{,}71 \cdot 10^{-5}$
8	32	7,8	222,3	9,42	55	$1{,}00 \cdot 10^{-5}$	$8{,}73 \cdot 10^{-2}$	$1{,}15 \cdot 10^{-4}$
9	21	7,6	194,3	3,61	45	$1{,}39 \cdot 10^{-5}$	$1{,}16 \cdot 10^{-1}$	$1{,}20 \cdot 10^{-4}$
10	23	8,2	195,1	8,55	38	–	$1{,}19 \cdot 10^{-2}$	–
11	23	7,6	184,7	3,43	88	$5{,}48 \cdot 10^{-5}$	$2{,}13 \cdot 10^{-1}$	$2{,}57 \cdot 10^{-4}$
12	50	7,9	222,3	9,03	43	$3{,}87 \cdot 10^{-5}$	$1{,}07 \cdot 10^{-1}$	$3{,}62 \cdot 10^{-4}$
13	34	8,2	209,7	8,98	89	$1{,}54 \cdot 10^{-5}$	$1{,}03 \cdot 10^{-2}$	$1{,}49 \cdot 10^{-3}$
14	40	7,9	201,7	7,52	51	$9{,}62 \cdot 10^{-5}$	$9{,}15 \cdot 10^{-2}$	$1{,}05 \cdot 10^{-3}$
15	39	8,0	150,2	7,11	57	$4{,}62 \cdot 10^{-5}$	$7{,}95 \cdot 10^{-2}$	$5{,}81 \cdot 10^{-4}$
16	11	8,6	165,6	7,66	2	$1{,}39 \cdot 10^{-5}$	$2{,}32 \cdot 10^{-3}$	$5{,}96 \cdot 10^{-3}$
17	12	8,5	235,0	13,80	2	$3{,}08 \cdot 10^{-6}$	$2{,}40 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$

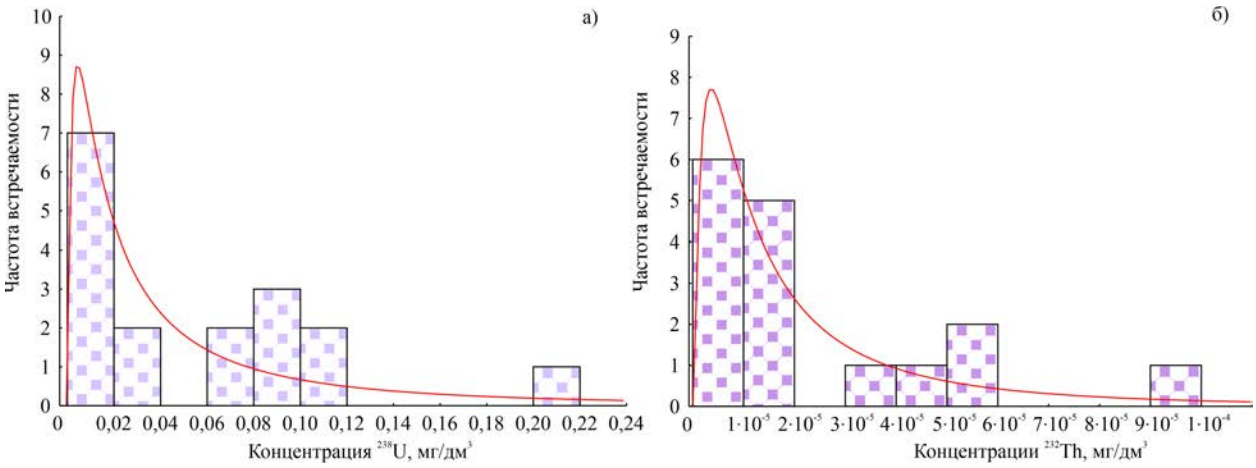


Рис. 2. Распределение U и Th в дренажных водах карьера Борок

мг/дм³ и тория – $2{,}67 \cdot 10^{-5}$ мг/дм³. При этом условии объемы выносимого урана и тория равны 151,4 и 61,4 килограмма соответственно.

Заключение

Резюмируя вышесказанное, отметим, что изученные воды преимущественно $Cl–SO_4–HCO_3$ Na–Mg–Ca и $SO_4–HCO_3$ Na–Mg–Ca состава с величиной общей минерализации 572–697 мг/дм³, отвечают условиям окислительной геохимической обстановки. Гидрогеологическое строение карьера достаточно сложное и его эксплуатация без постоянной откачки поступающих вод (2,24–2,35 млн м³ в год) невозможна, воды постоянно сбрасываются в реку Иня. Содержания природных радионуклидов составляют (мг/дм³): ^{238}U ($9{,}30 \cdot 10^{-3}$ – 0,21), ^{232}Th ($1{,}00 \cdot 10^{-6}$ – $9{,}62 \cdot 10^{-5}$). Активность радона (^{222}Rn) варьирует в интервале от 1 до 89 Бк/дм³. Экспертная оценка распределения радионуклидов в дренажных водах говорит об ежегодном объеме их выноса в среднем до 151,4 кг урана и до 61,4 кг тория. При этом следует отметить, что загрязнения радиоактивными элементами реки Иня не наблюдается. За счет процессов смешения ее вод с дренажными, концентрации (мг/дм³): ^{238}U варьируют от $2{,}32 \cdot 10^{-3}$ до $2{,}40 \cdot 10^{-3}$, а ^{232}Th от $3{,}08 \cdot 10^{-6}$ до $1{,}39 \cdot 10^{-5}$.

Исследования проводились при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025, РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-45-540004.

Литература

1. Бабин Г. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-44 – Новосибирск. Объяснительная записка / А. И. Черных, А. Г. Головина, С. В. Жигалов, С. С. Долгушин, Е. В. Ветров, Т. В. Кораблева, Н. А. Бодина, Н. А. Светлова, Г. С. Федосеев, А. П. Хилько, В. А. Епифанов, Ю. И. Лоскутов, И. Ю. Лоскутов, М. В. Михаревич, Е. А. Пихутин. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 392 с.
2. Вериго Е. К. Заельцовское месторождение радоновых вод (Новосибирское Приобье) / Быкова В. В., Гусев В. К. // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Западной Сибири, 1979. – Вып. 14. – С. 47–51.
3. Гречухин М. Н., Игнатов П. А. Новое гидрогенное месторождение урана Ульзит в Монголии // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, 2014. – № 4. – С. 27–33.
4. Гусев В. К., Радоновые воды Колывань-Томской складчатой зоны, их использование и охрана / Е. К. Вериго // Изменение природных условий под влиянием деятельности человека. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1984. – 176 с.
5. Конышев А. А., Сидкина Е. С., Солдатова Е. А., Догадкин Д. Н., Громяк И. Н. Особенности поведения химических элементов в системе вода-порода района разрабатываемого карьера бутового камня в Питкярантском рудном районе (Карелия) // Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 7–19.
6. Корнеева Т. В. Формы миграции химических элементов в радоновых водах месторождения «Горводолечебница» (г. Новосибирск) / Д. А. Новиков // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 2020. – № 17. – С. 287–291.
7. Мальковский В. И., Петров В. А., Диков Ю. П., Александрова Е. В., Бычкова Я. В., Мохов А. В., Шулик Л. С. Анализ коллоидных форм переноса урана подземными водами на U–Mo-месторождениях Стрельцовского рудного поля (Восточное Забайкалье) // Доклады академии наук, 2014. – Т. 454. – № 1. – С. 81–83.
8. Новиков Д. А. Гидрогеология и гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) / А. Ф. Сухорукова, Т. В. Корнеева // Геодинамика и тектонофизика, 2018. – Т. 9. – № 4. – С. 1255–1274.
9. Новиков Д. А. Гидрогеология и гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) / А. Ф. Сухорукова, Т. В. Корнеева // Геодинамика и тектонофизика, 2018. – Т. 9. – № 4. – С. 1255–1274.
10. Новиков Д. А. Гидрогеология и гидрогеохимия месторождения радоновых вод «Каменское» (г. Новосибирск) / А. Ф. Сухорукова, Т. В. Корнеева, Р. М. Каменова-Тоцева, А. А. Максимова, А. С. Деркачев, Ф. Ф. Дульцев, А. В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 192–208.
11. Новиков Д. А. Гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод / А. С. Деркачев, А. Ф. Сухорукова // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2019. – Т. 2. – № 1. – С. 125–132.
12. Новиков Д. А. Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадоновых вод «Инские источники» (юг Западной Сибири) / Ю. Г. Копылова, Л. Г. Вакуленко, А. Ф. Сухорукова, А. Н. Пыряев, А. А. Максимова, Ф. Ф. Дульцев, А. В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 135–145.
13. Новиков Д. А. Радионуклиды в природных водах Новосибирской городской агломерации / Ф. Ф. Дульцев, А. Ф. Сухорукова, А. А. Максимова, А. В. Черных, А. С. Деркачев // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием (г. Улан-Удэ, 17–20 августа 2020 г.), 2020. – С. 134–138.
14. Росляков Н. А. Естественные радионуклиды в геологической среде Новосибирской области / С. М. Жмодик, В. Г. Пахомов // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы IV Международной конференции. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 461–464.
15. De Caritat P., Danilova S., Jaeger Ø., Reimann C., Storrø G. Groundwater composition near the nickel-copper smelting industry on the Kola Peninsula, central Barents Region (NW Russia and NE Norway) // Journal of Hydrology, 1998. – V. 208. – P. 92–107.
16. Grosboisa C., Schäfer J., Bril H., Blanc G., Bossy A. Deconvolution of trace element (As, Cr, Mo, Th, U) sources and pathways to surface waters of a gold mining-influenced watershed // Science of the total environment, 2009. – V. 407. – P. 2063–2076.

17. Ivanova K., Stojanovska Z., Badulin V., Kunovska B., Yovcheva M. Radiological impact of surface water and sediment near uranium mining sites // Journal of Radiological Protection, 2015. – V. 35. – P. 819–834.
18. Manjón G., Mantero J., Vioque I., Galván J., Díaz-Francés I., García-Tenorio R. Some naturally occurring radionuclides (NORM) in a river affected by acid mining drainages // Chemosphere, 2019. – V. 223. – P. 536–543.
19. Mishra S., Maity S., Pandit G. G. Estimation of distribution coefficient of natural radionuclides in soil around uranium mines and its effect with ionic strength of water // Radiation Protection Dosimetry, 2012. – V. 152. – № 1–3. – P. 229–233.
20. Novikov D. A. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky-Mochishche zone of Novosibirsk, Russia / F. F. Dultsev, R. M. Kamenova-Totzeva, T. V. Korneeva // Environmental Earth Sciences, 2021. – V. 80. – № 216.
21. Novikov D. A. Microelements in Radon Waters of the Zaelsovsky field (The Southern Part of West Siberia) / T. V. Korneeva // Journal of Physics: Conference Series, 2019. – V. 1172. – № 1. – № 012096.
22. Novikov D. A. Microelements in radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia) / T. V. Korneeva // Journal of Physics: Conference Series, 2019. – V. 1172. – № 012096.
23. Novikov D. A. Role of water-rock interactions in the formation of the composition of radon waters of the Zaeltsovsky field (the southern part of West Siberia) / F. F. Dultsev, A. V. Chernykh // Journal of Physics: Conference Series, 2020. – V. 1451. – № 012007.
24. Yamamoto M., Sakaguchi A., Kofuji H. Uranium in acidic mine drainage at the former Ogoya Mine in Ishikawa Prefecture of Japan // J. Radioanal Nucl Chem., 2010. V. 283. – P. 699–705.

РАДИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫПАДЕНИЙ В РАЙОНАХ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ (ЮГ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

А. В. Таловская[1], Е. Г. Язиков[1], В. В. Литау[1], Т. Е. Адильбаева[1], Е. С. Торосян[2], Н. А. Осипова[1]

[1]Томский политехнический университет
Томск, Россия, talovskaya@tpu.ru
[2]Юргинский технологический институт Томского политехнического университета
Юрга, Россия

RADIOCHEMICAL SPECIFIC OF AEROSOLS IN THE AREAS IMPACTED WITH THERMAL POWER PLANTS (THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA)

A. V. Talovskaya[1], E. G. Yazikov[1], V. V. Litay[1], T. E. Adilbaeva[1], E. C. Torosyan[2], N. A. Osipova[1]

[1]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, talovskaya@tpu.ru
[2]Yurga Technological Institute
Tomsk Polytechnic University, Russia

The paper presents the results of study the radiogeochemical features of particulate matter deposited in snow cover around of thermal power plants. Instrumental neutron-activation analysis was used to study U and Th contents in the samples of particulate phase of snow. It was revealed that U and Th contents were exceeded the background values from 2 to 43 times in the samples. These results demonstrated the anthropogenic origin of the elements. It was identified that U occurred in mode of phosphates and oxides in the samples. Uranium isotopes were mainly correlated with Fe and Mg oxides and insoluble fractions.

Введение

Загрязнение атмосферного воздуха в значительной мере связано с развитием энергетики. Теплоэлектростанции (ТЭС) в городских и сельских поселениях являются одними из главных техногенных источников загрязнения. На территориях, прилегающих к ТЭС, уровни концентрации газовых и твердых выбросов часто превышают нормативные показатели. Среди выбросов ТЭС, преобладают выбросы от энергетических установок, использующих уголь. Экологические проблемы угольной энергетики связаны с присутствием в углях токсичных химических элементов, а также радиоактивных – урана и тория.

Эти элементы выбрасываются в атмосферный воздух в составе мелких и ультрамелких частиц, переносятся на большие расстояния и вовлекаются в геохимические циклы веществ [8, 12, 16].

В Западной Сибири сосредоточены ТЭС, использующие преимущественно уголь в своей топливной структуре. Один из крупнейших в стране и в мире угледобывающих районов – Кузнецкий угольный бассейн – расположен в Кемеровской области. Эти угли в основном используются на ТЭС юга Западной Сибири. Угли при этом характеризуются редкометалльной и радиоактивной геохимической специализацией [1–2, 4, 7]. Поэтому при сжигании углей может происходить антропогенная эмиссия элементов-примесей в окружающую среду. В результате формируются техногенные геохимические поля выпадений радиоактивных элементов в окрестностях ТЭС, которые необходимо детально изучать.

В данной работе представлены исследования уровня антропогенного загрязнения радиоактивными элементами (уран и торий) в зоне воздействия разных ТЭС юга Западной Сибири по результатам изучения состава снегового покрова как планшета-накопителя аэрозольных выпадений.

Материалы и методы

Объектами исследования были выбраны ТЭС, расположенные в городах юга Западной Сибири – в Омске, Томске, Северске, Кемерово и Юрге, а также в Центральном Казахстане – Караганде. На ТЭЦ Омска и Караганды используют угли Экибастузского бассейна, а на других изучаемых объектах – угли Кузнецкого бассейна. Отбор проб осуществляли на расстоянии от 0,5 до 4,5 км от источников загрязнения в направлении главенствующего ветра (юг-юго-западное). Кроме того, исследования проводили в зоне воздействия котельных, использующие уголь, природный газа и древесину, расположенные в сельских населенных пунктах Томской области. Для сравнения проведен отбор проб в зонах воздействия угледобывающих предприятий и других промышленных производств в городах.

Для отбора и подготовки проб снегового покрова использовали стандартную методику [5–6] с учетом нашего [13–15] многолетнего практического опыта эколого-геохимических исследований на территории юга Западной Сибири. Пробы отбирали из шурфа на всю мощность снегового покрова, за исключением 5-сантиметрового слоя над почвой. Вес каждой пробы достигал 16–17 кг. После отбора пробы замеряли площадь шурфа и фиксировали дату отбора. Таяние проб снега осуществляли при комнатной температуре. Талую снеговую воду фильтровали через бумажный фильтр типа «синяя лента». Полученный после фильтрования твердый осадок из снеговой пробы высушивали, просеивали с выделением фракции менее 1 мм, а затем взвешивали.

Все пробы твёрдого осадка снега и пробы золы уноса с некоторых изучаемых ТЭС были проанализированы инструментальным нейтронно-активационным анализом на содержание (концентрация, мг/кг) 28 химических элементов, включая уран и торий, в аккредитованной ядерно-геохимической лаборатории, функционирующей на базе исследовательского ядерного реактора при Томском политехническом университете (аналитики: А. Ф. Судыко, Л. В. Богутская). Анализ отдельных микрочастиц в пробах выполнялся на сканирующем электронном микроскопе (Hitachi S-3400N с ЭДС BrukerXFlash 4010) в лаборатории МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ (консультант: к.г.-м.н., ассистент Ильенок С. С.).

На основе полученной информацией рассчитывали коэффициент концентрации согласно методическим работам [5–6] относительно фона, данные по которому опубликованы в работах [10, 13–15], а также наших данных для района расположения Обсерватория «Фоновая» ИОА СО РАН. Статистический анализ данных содержания элементов в пробах выполнялся в программе «Statistica».

Результаты и их обсуждение

В пробах твердого осадка снега из зон воздействия изучаемых ТЭС средние значения концентрации урана изменяются от 1,9 до 8,7 мг/кг, что соответствует коэффициентам концентрации относительно фона из работ [12–13] – от 9 до 43, а тория – от 4,6 до 15,6 мг/кг, превышающие фон от 1,5 до 5 раз (табл. 1). В сравнении с фоном обсерватория «Фоновая» содержание урана изменяется от 1,6 до 4,5 фонов, а тория – от 1,5 до 3 фонов. Для всех изучаемых проб характерна техногенная радиогеохимическая специализация Статистически значимые высокие значения концентраций радиоактивных элементов определены для проб из района расположения ТЭЦ в Юрге и в Северске относительно данных для других изучаемых объектов. В районе ТЭЦ Юрги эта особенность может быть связана с использованием углей, которые обогащены радиоактивными элементами [1, 7]. В окрестностях ТЭС г. Северск повышенные уровни накопления радиоактивных элементов в пробах возможно еще за счет наложение техногенного геохимического воздействия расположенного вблизи предприятия ядерно-топливного цикла. Пробы из зоны воздействия ГРЭС в Томске отличаются пониженными значениями радиоактивных элементов, что может быть связано с использованием в топливном балансе кроме угля еще и природного газа. Также нами обнаружены высокие уровни накопления относительно фона урана и тория в пробах из зоны воздействия сельских котельных, работающие на углях.

Выявлены наиболее высокие концентрации урана и тория в пробах из окрестностей ТЭС, использующие угли Кузнецкого бассейна, в сравнении с

результатами исследования проб их районов расположения ТЭЦ, где сжигаются угли Экибастузского бассейна. Эта тенденция также хорошо прослеживается по значениям отношения тория к урану в пробах.

Важным индикаторным показателем для типизации территорий является отношения тория к урану (Th/U) [9–10, 14–15]. По значениям Th/U отношения в пробах твердого осадка снега, ТЭС и другие промышленные объекты можно объединить в четыре области (рис. 1).

Для первой области (I) отношение Th/U близко к 1 единице и ниже, что свидетельствует о урановой природе. В этой области сосредоточены промышленные районы, в производстве которых отмечаются повышенные концентрации урана. Среди них выделяется промышленная зона с редкометалльным производством в г. Усть-Каменогорск (Восточный Казахстан), представленная Ульбинским комбинатом. Эту область также составляет зола уноса с ГРЭС (г. Кемерово).

Для второй области (II) величина Th/U изменяется от 1 до 2 единиц. В эту область включены пробы из зоны воздействия ТЭЦ (г. Юрга), сельских угольных котельных (Томская область), угольной шахты (г. Черногорск). В эту группу также входит НПЗ (г. Ачинск [11]), что обусловлено пониженным содержанием радиоактивных элементов в пробах. В этой области также находятся угли Кузнецкого бассейна [1].

Для третьей области (III) величина Th/U изменяется от 2 до 5 единиц, указывая на смешенную природу поступления радиоактивных элементов. В этой группе сосредоточены в основном изучаемые объекты ТЭС (гг. Омск, Томск, Северск, Кемерово, Караганда), а также в г. Новосибирск [3], котельные, использующие древесину и природный газ (Томская область), угледобывающие предприятия (гг. Междуреченск, Киселевск), ядерно-топливный цикл (г. Северск) и кирпичные заводы (г. Томск). В этой области

Таблица 1. Содержание радиоактивных элементов и торий-урановое отношение в пробах твердого осадка снега в районах размещения предприятий теплоэнергетики на юге Западной Сибири

Предприятия теплоэнергетики	Диапазон содержаний*, мг/кг		Th/U	Средние значения коэффициентов концентрации относительно фона [10, 13–15]]	
	U	Th		U	Th
ТЭЦ-5 г. Омск	$\frac{3,2}{2,8-4,2}$ 12	$\frac{8,5}{7,6-10,6}$ 12	2,6	16,0	2,9
ГРЭС-2 г. Мыски	$\frac{5,1}{2,1-8,2}$ 20	$\frac{11,9}{5,1-18,4}$ 20	2,3	25,5	4,1
ТЭЦ г. Северск	$\frac{6,9}{3,6-10,1}$ 14	$\frac{15,6}{7,2-19,6}$ 14	2,3	34,5	5,4
ГРЭС-2 г. Томск	$\frac{3,9}{1,4-7,9}$ 69	$\frac{7,8}{2,4-13,2}$ 69	2,0	19,5	2,7
ГРЭС г. Кемерово	$\frac{4,8}{3,3-6,9}$ 9	$\frac{14,3}{8,8-18,1}$ 9	2,9	24,0	4,9
ТЭЦ г. Юрга	$\frac{8,7}{7,5-8,1}$ 7	$\frac{15,6}{12,5-17,5}$ 7	1,8	43,5	5,4
ТЭЦ г. Караганда	$\frac{1,9}{0,7-2,9}$ 18	$\frac{4,6}{2,9-5,6}$ 18	2,4	9,5	1,6
Котельные на угле**	$\frac{6,1}{2,3-7,1}$ 26	$\frac{8,6}{4,3-14,9}$ 26	1,4	30,5	2,9
Котельные на древесине**	$\frac{1,1}{0,6-1,1}$ 5	$\frac{2,9}{1,5-4,8}$ 5	2,6	5,5	1,0
Котельные на природном газе**	$\frac{2,3}{0,4-3,2}$ 11	$\frac{4,6}{1,4-6,6}$ 11	2,0	11,5	1,6
Региональный фон [10, 13–15]	0,2	2,9	14,5	–	–
Фон – Обсерватория «Фоновая» ИОА СО РАН	1,9	5,5	2,9	–	–

* – в числителе – среднее, знаменателе – минимально-максимальное значение и количество проб; ** – сельские населенные пункты Томской обл.

также сосредоточены зола уноса и угли с изучаемых ТЭС, что указывает на источники поступления радиоактивных элементов в районах размещения ТЭС.

Для четвертой области (IV) отношение Th/U составляет более 5 единиц, что свидетельствует о ториевой природе. Для этой группы характерны низкие концентрации урана. Такие значения торий-уранового отношения характеризуют фоновый район для Западно-Сибирского региона [10, 13–15].

По результатам изучения проб на сканирующем электронном микроскопе выявлены твердофазные формы нахождения урана, представленные U-содержащими частицами (рис. 2). В пробах из района расположения угольных объектов теплоэнергетики (ТЭС и угольные котельные), использующие кузнецкие угли, U-содержащие частицы представлены в виде оксидов урана (рис. 2). Микрофазы фосфатов урана характерны для проб, отобранных в окрестностях ТЭС, где применяется экибастузский уголь. Торий выявлен в виде примеси в составе частиц, содержащие фосфаты редкоземельных элементов.

На примере ГРЭС (г. Томск), где используются угли Кузнецкого бассейна и природный газ, нами были изучены формы нахождения урана и трансурановых элементов в пробах твердого осадка снега. С помощью метода f-радиографии в пробах выявлена молекулярно-рассеянная форма радионуклидов, представленная на детекторе в виде распределения единичных треков от осколков деления радионуклидов [13]. Выявлены высокие значения (5788 трек/мм^2) плотности единичных треков от осколков деления радионуклидов на детекторе в сравнении с фоновыми значениями (1146–1588 трек/мм^2) и для проб из районов г. Томск (1792–2835 трек/мм^2), не

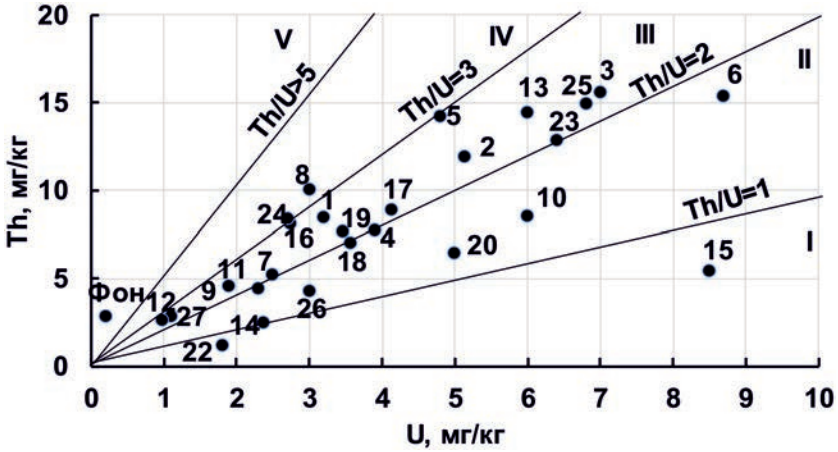


Рис. 1. Радиогеохимическая типизация твердого осадка снегового покрова в районах размещения предприятий теплоэнергетики на юге Западной Сибири

(1–9 – ТЭС: 1 – ТЭЦ-5 г. Омск; 2 – ГРЭС г. Мыски; 3 – ТЭЦ г. Северск; 4 – ГРЭС-2 г. Томск; 5 – ГРЭС г. Кемерово; 6 – ТЭЦ г. Юрга; 7 – ТЭЦ-3 г. Новосибирск [3]; 8 – ТЭЦ-2 г. Новосибирск [3]; 9 – ТЭЦ г. Караганда; 10–12 – котельные Томская область: 10 – котельные на угле; 11 – котельные на природном газе; 12 – котельные на древесине; 13–20 – предприятия: 13 – ЯТЦ (г. Северск); 14 – НПЗ (г. Ачинск [11]); 15 – промзона (г. Усть-Каменогорск); 16 – кирпичный завод (г. Томск); 17 – угольный разрез (г. Междуреченск); 18 – угольная шахта (г. Междуреченск); 19 – угольный разрез (г. Киселевск); 20 – угольная шахта (г. Черногорск); 22–25 – зола-уноса ТЭС; 22 – с ГРЭС г. Кемерово; 23 – с ГРЭС г. Томск; 24 – с ТЭЦ г. Караганда; 25 – с ТЭЦ г. Северск; 26 – кузнецкий уголь [1]; 27 – экибастузский уголь [1–2]; фон – [10, 13–15].

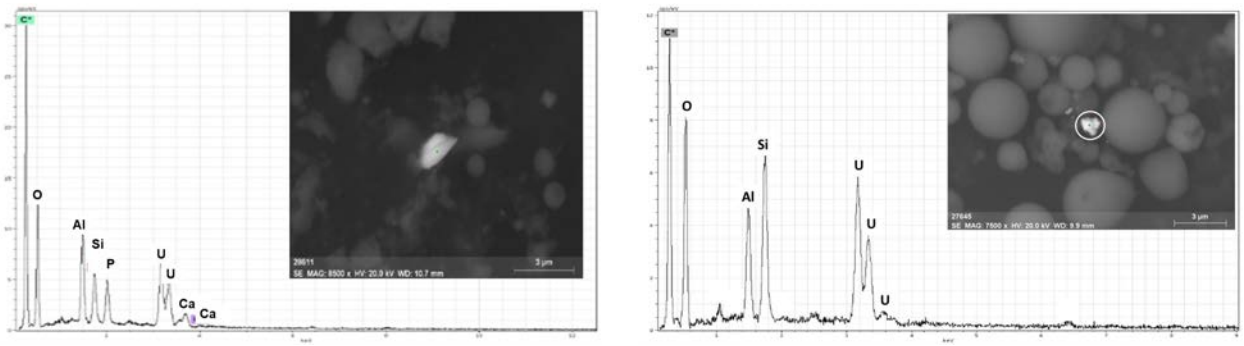


Рис. 2. Микрофотографии и энергодисперсионные спектры уран-содержащих микрофаз в пробах твердого осадка снега из зоны воздействия объектов теплоэнергетики, использующих уголь: а) в форме фосфатов; б) в форме оксидов (данные сканирующей электронной микроскопии)

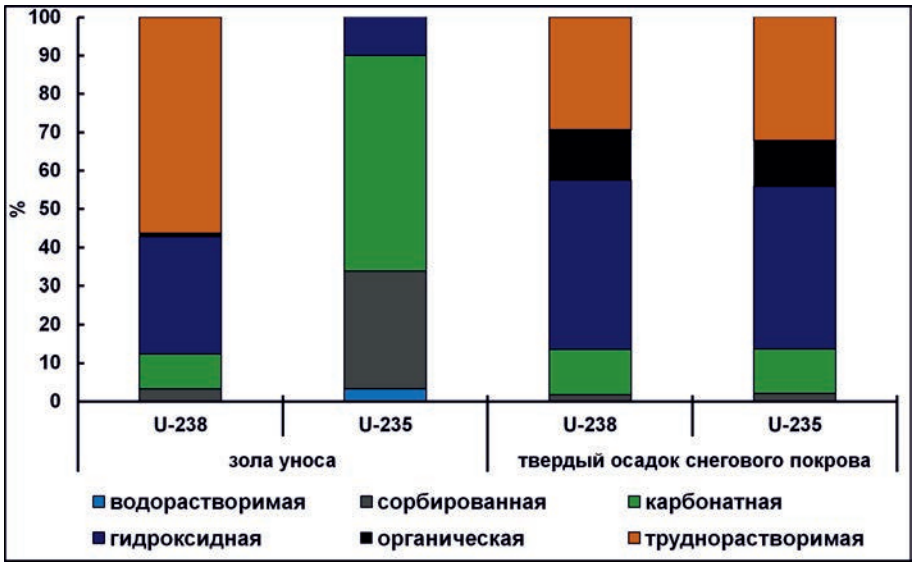


Рис. 3. Формы нахождения изотопов урана-238 и урана-235 в твердом осадке снега из района расположения ТЭС и золе уноса

подвергаемых воздействию ТЭС, а также для проб из г. Междуреченск (1350 трек/мм^2), где функционируют угледобывающие предприятия [13].

В пробах из ближней зоны воздействия ГРЭС г. Томск (до 1 км) и в зоне уноса этой ГРЭС определены долевые соотношения различных фракций изотопов урана-238 и урана-235 методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в вытяжках, полученных последовательным экстрагированием химическими растворами (Радиоэкологический цент, Норвегия). В результате определено, что в пробах твердого осадка снега основная доля ^{238}U и ^{235}U ассоциирована с оксидами железа и марганца (около 40 %) и трудно-растворимыми соединениями (около 30 %), а с карбонатными и органическими – около 10 % (рис. 3).

Это соотношение отличается от золы уноса, в которой ^{238}U связан в основном с труднорастворимыми соединениями (56 %), а ^{235}U – с карбонатными (56 %). В золе уноса ^{238}U и ^{235}U также находятся с оксидами железа и марганца – 30 и 42 %, соответственно.

Заключение

Таким образом, по данным изучения радиогеохимических особенностей твердого осадка снега в районах расположения ТЭС и угледобывающих предприятий на юге Западной Сибири и в Центральном Казахстане отмечается преимущественно смешанная природа поступления радиоактивных элементов. В пробах твердого осадка снега из зоны воздействия ТЭС, использующие кузнецкие угли, выявлены наиболее высокие концентрации урана и тория в сравнении с результатами исследования проб их районов расположения ТЭС, где сжигаются экибастузские угли. Близкие уровни накопления радиоактивных элементов, а также величины Th/U отношения в пробах и золе уноса указывают на источники поступления этих элементов как сжигание угля. В пробах выявлены частицы, содержащие уран в форме оксидов и фосфатов. На примере одной из изученных ГРЭС выявлено, что уран и трансурановые элементы в пробах находятся в молекулярно-рассеянной форме, а изотопы урана-235 и урана-238 в основном связаны с оксидами железа и марганца, труднорастворимыми соединениями. Установленные радиогеохимические особенности проб твердого осадка снега в районах расположения изученных ТЭС можно рассматривать как индикаторы техногенного воздействия объектов теплоэнергетики, использующие уголь в технологическом процессе.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 20-05-00675 А и № 16-45-700184 р_а. Исследования выполнены в НИ ТПУ в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

Литература

1. Арбузов С. И. Геохимия редких элементов в углях Сибири / С. И. Арбузов, В. В. Ершов. – Томск: Изд. дом «Д-Принт», 2007. – 468 с.
2. Арбузов С. И. Металлоносность углей Сибири // Известия Томского политехнического университета, 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 77–83.
3. Артамонова С. Ю. Уран и торий в аэрозольных выпадениях г. Новосибирска и его окрестностей (Западная Сибирь) // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов, 2020. – Т. 331 – № 7. – С. 212–223.

4. Волостнов А. В., Арбузов С. И. Токсичные элементы в углях Сибири // Энергетик, 2011. – № 3. – С. 39–44.
5. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Сает, Б. А. Ревич, Е. П. Янин и др. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
6. Касимов Н. С. Геохимия снежного покрова в восточном округе Москвы / Н. С. Касимов, Н. Е. Кошелева, Д. В. Власов, Е. В. Терская // Вестн. Моск. ун-та, сер. 5. География, 2012. – № 4. – С. 14–24.
7. Нифантов Б. Ф. Угли Кузбасса: химические элементы-примеси и технологии их извлечения при комплексном освоении месторождений / Б. Ф. Нифантов В. П. Потапов, Б. А. Анфёров, Л. В. Кузнецова. – Кемерово: ИУ СО РАН, 2011. – 310 с.
8. Ревич Б. А. К оценке влияния деятельности ТЭК на качество окружающей среды и здоровье населения // Проблемы прогнозирования, 2010. – № 4. – С. 87–99.
9. Рихванов Л. П. Радиоактивные элементы в окружающей среде / Л. П. Рихванов, С. И. Арбузов, Н. В. Барановская, А. В. Волостнов, Т. А. Архангельская, А. М. Межибор, В. В. Берчук, Л. В. Жорняк, Ю. Л. Замятина, А. Ю. Иванов, А. В. Таловская, С. С. Шатилова, Е. Г. Язиков // Известия ТПУ, 2007. – Т. 311 – № 1. – С. 128–136.
10. Шатилов А. Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: дис. … канд. геол.-мин. наук. – Томск, 2001. – 205 с.
11. Шахова Т. С. Влияние нефтеперерабатывающих заводов на эколого-геохимическую обстановку прилегающих территорий по данным изучения снегового покрова (на примере гг. Омск, Ачинск, Павлодар): автореф. дис. … канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2018. – 22 с.
12. Юдович Я. Э. Токсичные элементы-примеси в углях / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 655 с.
13. Язиков Е. Г. Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв: монография / Е. Г. Язиков, А. В. Таловская, Л. В. Жорняк. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 264 с.
14. Язиков Е. Г. Радиоактивные элементы в атмосферных выпадениях снегового покрова урбанизированных территориях / Е. Г. Язиков, А. В. Таловская, Е. А. Филимоненко, В. В. Литау, Т. Е. Адильбаева, Т. С. Шахова // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. – Томск, 2016. – С. 747–751.
15. Язиков Е. Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: дис. … докт. геолого-минерал. наук. – Томск, 2006. – 423 с.
16. Russell M. C. The impact of three recent coal-fired power plant closings on Pittsburgh air quality: a natural experiment / M. C. Russell, J. H. Belle, Y. Liu // Journal of the Air & Waste Management Association, 2017. – V. 67. – № 1. – P. 3–16.

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В АЭРОЗОЛЯХ ВОЗДУХА (PM-10, PM-2.5) МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

А. Е. Темиржанова[1], Е. Г. Язиков[2], М. Т. Дюсембаева[1], Е. З. Шакенов[1], Г. М. Есильканов[1], Н. Ж. Мухамедияров[1], А. Ж. Ташекова[1], В. В. Колбин[1]

[1]Институт радиационной безопасности и экологии
Курчатов, Казахстан, temirzhanova.aray@mail.ru
[2]Томский политехнический университет
Томск, Россия, yazikov@tpu.ru

SEASONAL DYNAMICS OF HEAVY METALS AND NATURALLY OCCURRING RADIONUCLIDES IN AIR AEROSOLS (PM-10, PM-2.5) OF SAMLL SETTLEMENTS

A. Ye. Temirzhanova[1], Ye. G. Yazikov[2], M. T. Dyusembayeva[1], Ye. Z. Shakenov[1], G. M. Yesilkanov[1], N. Zh. Mukhamediyarov[1], A. Zh. Tashekova[1], V. V. Kolbin[1]

[1]Institute of Radiation Safety and Ecology
Kurchatov,Kazakhstan, temirzhanova.aray@mail.ru
[2]TomskPolytechnic University
Tomsk, Russia, yazikov@tpu.ru

As of today, the chemical composition of natural components of Semipalatinsk Test Site (STS) and adjacent areas are poorly studied. The chemical composition of air aerosol particulate matter (PM-2.5, PM-10) is of special interest as it contains all kinds of heavy metals, toxic elements, and radionuclides [1, 2, 3]. Suspended substances of less than 10 micron travel to a long distance and are potential contaminators of the major natural components. For which reason, amatterofresearcha rises to reveal spatial distribution of the content of chemical elements and radionuclides on STS and in the adjacent area by studying air aerosol particulate matter.

Введение

Впервые проведено исследование по определению массовых концентраций и элементного составов твердых частиц аэрозолей воздуха, размерами 10 и 2,5 мкм (PM-10, PM-2.5) в атмосфере малых населенных пунктов, на примере с. Долонь. Данный населенный пункт находится в непосредственной близости (40 км) от границ Семипалатинского испытательного полигона (СИП), в районе прохождения одного из радиоактивных следов выпадения, т. е. по Восточному следу. Отбор проб был проведен в отопительный и неотопительный сезоны для оценки различий между летними и зимними концентрациями химических компонентов и естественных радионуклидов атмосферного воздуха прилегающих зон СИП в северо-восточном направлении. Исследуемые твердые частицы представляют собой сложную смесь, содержащую тяжелые металлы, радионуклиды и множество других химических компонентов, в зависимости от их источников образования [4, 5, 6]. Изучение переноса, химического и радионуклидного составов, а также сезонной динамики таких малых атмосферных частиц позволил выявить основные источники их формирования и дальность их пространственного распределения.

Материалы и методы

Твердые частицы аэрозолей воздуха. Среднесуточные пробы твердых частиц аэрозолей воздуха отбирали переносным пробоотборником воздуха CF-993B с фиксированной скоростью на стационарном посту мониторинга. Стационарный пост был расположен на ровном участке ландшафта вдали от строений, леса и других препятствий на высоте 1,5 м от поверхности земли с твердым непылящим покрытием.

Подготовку фильтров с пробами твердых частиц аэрозолей воздуха для элементного анализа проводили способом автоклавного разложения, с использованием концентрированныхфтористоводородной (HF) и азотной (HNO_3) кислот в соотношении 1 : 2. Автоклавы выдерживали в сушильном шкафу в течение 4 ч., нагретый до температуры 160 °С, приливали 7 М азотную кислоту и выпаривали раствор до образования сухих солей при температуре +160 °С. После охлаждения объем растворадоводили до 15 мл 7 М HNO_3.

В каждой партии фильтров для отбора твердых частиц аэрозолей воздуха анализировали содержание химических элементов в чистых неэкспонированных фильтрах.

Определение содержания естественных радионуклидов, тяжелых металлов, редкоземельных элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) с использованием квадрупольного масс-спектрометра Agilent 7700x «Agilent Technologies», а также атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС) iCAP 6000 Duo «Thermo Scientific». Спектрометры были откалиброваны с помощью сертифицированных мультиэлементных стандартных образцов, производства США, компании «Perkin Elmer». Относительное стандартное отклонение (RSD) измерений было меньше 10 %.

Результаты и их обсуждение

Сезонные колебания концентрации твердых частиц, размером 10 мкм исследуемого региона имеют четко выраженный характер, более высокие содержания этих частиц зафиксированы в неотопительный период 70 мкг/м^3, в отопительный – около 40 мкг/м^3. Более мелкие частицы аэрозолей воздуха размером 2,5 мкм преимущественно антропогенного происхождения распределились иначе, в зимний сезон их концентрация больше в 2,5 раза в сравнении с летним содержанием, 25 мкг/м^3 на 10 мкг/м^3 соответственно.

Также в даннойработе исследована связь между концентрацией твердых частиц и метеорологическими переменными, такими как направление и скорость ветра, температура и влажность. Так, например между содержанием PMи увеличением относительной влажности установлена положительная корреляция (коэффициент корреляции равен 0,5), тогда как между температурой окружающей среды и массой PM – отрицательная (коэффициент корреляции равен – 0,7), что говорит об их взаимозависимости.

Были исследованы среднемесячные концентрации исследуемых химических элементов и естественных радионуклидов в твердых частицах аэрозолей воздуха. Выявлена группа элементов со стабильной динамикой распределения концентрации по сезонам за исследуемый период. Элементы этой группы – Cu, Ni, Co (таблица 1).

Определена схожая картина распределения среднесуточных концентраций меди и никеля по некоторым месяцам отопительного и неотопительного сезонов. Разница между средними значениями концентрации за отопительный и неотопительный сезоны по никелю составляет 1,3 раза, по меди – 1,4 раза. Стабильность динамики распределения содержания кобальта наблюдается практически по всем месяцам, за исключением месяцев март и декабрь. Такого рода динамика распределения содержания данных элементов независимо от периодов свидетельствует

Таблица 1. Среднемесячная концентрация и пределы колебаний химических элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха (n = 51)

Месяцы	Элементы, нг/м^3		
	Co	Ni	Cu
Март, n = 9	0,20 0,03–1,5	3,8 0,10–7,7	170 100–470
Апрель, n = 7	0,03 0,03–1,3	0,8 0,1–7,8	86 21–140
Июнь, n = 5	0,03 0,03–0,03	0,10 0,10–0,10	80 80–80
Июль, n = 6	0,03 0,03–0,03	6,7 4,2–7,7	190 120–250
Август, n = 6	0,03 0,03–0,03	7,5 5–14	260 150–380
Сентябрь, n = 4	0,03 0,03–0,03	4,6 0,20–7,6	160 150–340
Октябрь, n = 6	0,07 0,03–4,3	13 12–31	290 150–520
Декабрь, n = 8	0,9 0,03–5	0,10 0,10–50	260 19–580
ПДК$_{с.с.}$/ОБУВ	1000	1000	2000

в числителе – значение медианы, в знаменателе – минимальное и максимальное значение концентраций элементов; ПДК$_{с.с.}$ – средне суточные предельно-допустимые концентрациизагрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест [7]; ОБУВ – ориентировочные безопасные уровни воздействия загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест [8]; пределы обнаружения элементов даны в мкг/л.

об их разных источниках поступления в атмосферный воздух исследуемой территории. Возможно, наличие концентрации меди и никеля в отопительный период связано с интенсивным процессом сжигания твердого топлива, поскольку в пробах золы были обнаружены повышенные концентраций этих элементов.

Среднее содержание естественного радионуклида ^{238}U в исследуемых образцах твердых частиц аэрозолей воздухасоставило за отопительный период $1,8 \cdot 10^{-5}$ Бк/м^3, за неотопительный – $8,4 \cdot 10^{-6}$ Бк/м^3. Также за неотопительный период эпизодически были уловлены концентрации ^{235}U. Так, в марте, апреле и начале октября средняя объемная активность данного изотопа составила $4,5 \cdot 10^{-7}$ Бк/м^3. Однако, следует отметить, что соотношение изотопов урана имеет природный характер. Значимые данные были получены и по содержанию ^{232}Th (таблица 2).

Максимальный пик возрастания уровня содержания исследуемого радионуклида приходится на июнь месяц, где объемная активность равна $2,0 \cdot 10^{-5}$ Бк/м^3. Данная динамика распределения содержания естественных радионуклидов свидетельствует о почвенно-эрозионном вкладе. Анализ полученных данных показал, что в пробах воздушных аэрозолей превышения предельно допустимой концентрации среднесуточного содержания естественного радионуклида (Th) и других исследуемых химических элементов не выявлено. Следует отметить, что такие нормируемые компоненты, как Be, Zn, Cd в твердых частицах аэрозолей воздуха не были обнаружены.

Таблица 2. Объемная активность и пределы колебаний ^{232}Th в твердых частицах аэрозолей воздуха (n = 51)

Месяцы	^{232}Th, Бк/м^3
Март, n = 9	$\frac{2,0 \cdot 10^{-7}}{2,0 \cdot 10^{-7}–2,0 \cdot 10^{-7}}$
Апрель, n = 7	$\frac{5,7 \cdot 10^{-6}}{2,0 \cdot 10^{-7}–9,3 \cdot 10^{-6}}$
Июнь, n = 5	$\frac{2,0 \cdot 10^{-5}}{1,2 \cdot 10^{-5}–5,7 \cdot 10^{-5}}$
Июль, n = 6	$\frac{4,1 \cdot 10^{-6}}{8,1 \cdot 10^{-7}–7,3 \cdot 10^{-6}}$
Август, n = 6	$\frac{6,5 \cdot 10^{-6}}{2,4 \cdot 10^{-7}–1,7 \cdot 10^{-5}}$
Сентябрь, n = 4	$\frac{2,0 \cdot 10^{-7}}{2,0 \cdot 10^{-7}–2,0 \cdot 10^{-7}}$
Октябрь, n = 6	$\frac{2,0 \cdot 10^{-7}}{2,0 \cdot 10^{-7}–2,0 \cdot 10^{-7}}$
Декабрь, n = 8	$\frac{2,0 \cdot 10^{-7}}{2,0 \cdot 10^{-7}–2,0 \cdot 10^{-7}}$

Заключение

В результате была получена информация об уровне загрязнения воздуха твердыми частицами в данной провинции, а также об их источнике путем определения концентраций некоторых микроэлементов и естественных радионуклидов. Одними из источников формирования химического и радионуклидного составов исследуемых частиц аэрозолей прилегающих зон к СИПна данный момент являются преимущественно почвенно-эрозионный процесс, а также сжигание твердого топлива. Однако, для оценки вклада СИП в качественный состав воздуха прилегающих зон необходимы дополнительные исследования по изучению химического и радионуклидного составов PM-10 и PM-2.5 непосредственно отобранных с основных площадок СИП и по господствующему направлению ветра.

Литература

1. Byeon S. H. Chemical characterization of outdoor and subway fine (PM(2.5-1.0)) and coarse (PM(10-2.5)) particulate matter in Seoul (Korea) by computer-controlled scanning electron microscopy (CCSEM) / S. H. Byeon, R. Willis, T. M Peters // Int J Environ Res Public Health, 2015. – № 12 (2). – P. 2090–2104. doi:10.3390/ijerph120202090.
2. Zeb B. On the Morphology and Composition of Particulate Matter in an Urban Environment. / B. Zeb, K. Alam, A. Sorooshian, T. Blaschke, I. Ahmad, I. Shahid // Aerosol Air Qual Res., 2018. – 18 (6). – P. 1431–1447. doi:10.4209/aaqr.2017.09.0340.
3. Remoundaki E. PM10 composition during an intense Saharan dust transport event over Athens (Greece). / E. Remoundaki; A. Bourliva; P. Kokkalis, R. E. Mamouri; A. Papayannis; T. Grigoratos; C. Samara; M. Tsezos// Sci Total Environ., 2011. – 409 (20). – P. 4361–4372. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.06.026.
4. Minguillón M. C. Fine and coarse PM composition and sources in rural and urban sites in Switzerland: local or regional pollution? / M. C. Minguillón, X. Querol, U. Baltensperger, A. S. Prévôt // Sci Total Environ. 2012; 427-428:191-202. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.04.030.
5. Hsu C. Y. Elemental characterization and source apportionment of PM10 and PM2.5 in the western coastal area of central Taiwan. / C. Y. Hsu, H. C. Chiang, S. L. Lin, M. J. Chen, T. Y. Lin, Y. C. Chen // Sci Total Environ., 2016. – № 541. – P. 1139–1150. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.09.122.
6. Bozkurt Z. Mass concentrations and elemental compositions of PM10 in Duzce, Turkey. / Z. Bozkurt, F. Taspinar, B. Pekey, H. Pekey, O. O. Uzmez,

T. Dogeroglu, O. E. Gaga // Athens Journal of Sciences, 2017. – № 4 (2). – P. 87–100. https://doi.org/10.30958/ajs.4-2-1.
7. Гигиенические нормативы к атмосферному воздуху в городских и сельских населенных пунктах, утверждены приказом Министра национальной экономики Республики Казахстан от 28 февраля 2015 года № 168. http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500011036/links.
8. ГН 2.1.6.3492-17 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений от 22 декабря 2017 года N 165. http://docs.cntd.ru/document/556185926.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ УРАН-238, ТОРИЙ-232 И РАДИЙ-226 В ПРИЗЕМНОМ ВОЗДУХЕ ПРИ СУХОМ ОСАЖДЕНИИ АЭРОЗОЛЕЙ

М. П. Тентюков

Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина
Сыктывкар, Россия, tentukov@ib.komisc.ru

CHARACTERISTICS OF NATURAL RADIONUCLIDES DISTRIBUTION SUCH AS URANIUM-238, THORIUM-232 AND RADIUM 226 IN SURFACE AIR DURING DRY DEPOSITION OF AEROSOLS

M. P. Tentyukov

Pitirim Sorokin Syktyvkar State University
Syktyvkar, Russia, tentukov@ib.komisc.ru

A new method for studying the radioactive aerosols distribution in the surface air using the passive aerosol collection method is proposed. A description of the method and device for passive aerosol collection is given. The method approbation results are presented.

Введение

Известно, что носителями радиоактивности в атмосфере являются аэрозольные частицы в интервале радиусов от 0,015 до 0,5 мкм [1]. Между тем, в настоящее время содержание аэрозольных вещества в атмосфере постоянно растет [2], что во многом обусловлено усилением загрязнения воздушной среды за счет эмиссии пылевых частиц с земной поверхности, объем которых за последние сто лет в тропосфере возрос почти в два раза [3]. При этом ежегодная доля поступления земной пыли в газовую оболочку планеты составляет до 1,600 млрд. т [4], из которых 75 % оседает на сушу, а 25 % – в океан. Земная пыль в атмосфере способствует расширению спектра размеров аэрозольных частиц, участвующих в воздушном переносе радиоактивности. Предполагается, что определенную роль в этом процессе играют аэрозольные частицы диаметром 0,1–10,0 мкм. Они составляют более 70 % объёма концентрации всех взвешенных в атмосфере частиц и примерно половину суммарной поверхности аэрозолей [5]. Их доля в общем объёме выпадающих осадков для умеренных широт равна 10÷20 %, и при сухом осаждении аэрозольные частицы содержат загрязняющих веществ на 25 % больше, чем дождевые осадки [6]. В этой связи изучение особенностей распределения радионуклидов в приземном воздухе при сухом осаждении аэрозолей весьма актуально.

Методика

К обоснованию способа пассивного пробоотбора аэрозолей. Существует активный способ сбора аэрозолей, включающий осаждение на многослойные фильтры путем прокачки потока воздуха (аспирацией) сквозь фильтры с использованием специальных вентиляционных установок (аспираторов) [7]. Между тем, количественные характеристики, полученные таким способом, нельзя рассматривать как приходные части баланса вещества в экосистеме. Они отображают потенциальные запасы аэрозольного вещества в приземном воздухе, которые не всегда и не полностью поступают на подстилающую поверхность [8]. Способ пассивного пробоотбора аэрозолей более полно воспроизводит природные процессы осаждения аэрозолей. Его механизм основан на молекулярной диффузии частицы из анализируемого объекта к сорбенту. Последний представляет собой определенным образом подготовленную подложку с

селективным химическим реагентом [9, 10]. Первыми, кто применил пассивный пробоотборник, были Палмз (E. D. Palmes) и Ганнисон (A. F. Gunnison): в 1973 г. они разработали специальное устройство – пассивный пробоотборник – для измерения концентрации диоксида азота в рабочей зоне [11]. Ими же теоретически обоснована работа пассивного пробоотборника [12]. Простота изготовления и эксплуатации пассивных пробоотборников, а также большое разнообразие реагентов, используемых для детектирования вредных веществ, быстро расширили сферу их практического применения не только в промышленной гигиене [13], но и экологических исследованиях [14]. Результаты показывают, что пассивный пробоотбор достаточно эффективен и при оценке загрязнения воздуха органическими веществами и прилегающих к ним территорий. Пассивные пробоотборники являются очень привлекательными для исследований состояния атмосферного воздуха, когда надо получить осредненную за относительно длительный период времени (от недель до месяцев) количественную оценку атмосферного загрязнения. Однако отмечается, что перед длительным экспонированием пассивные пробоотборники необходимо проверить на устойчивость к воздействию погодных факторов [15], поскольку процесс сорбции аэрозолей зависит от метеорологических параметров внешней среды [16], химического взаимодействия между реагентом подложки и отбираемым загрязнителем [17].

Такая сложная предустановочная подготовка пассивных пробоотборников и ограничения по времени их экспонирования сдерживает применение пассивных пробоотборников для целей мониторинга окружающей среды. Между тем, технологичность и простоту пассивного пробоотбора можно увеличить, если применять в качестве подложки (субстрата) химически инертные материалы, а их экспонирование осуществлять в специальных устройствах.

В данной работе представлен анализ экспериментальных результатов, характеризующих особенности распределения радионуклидов в сухих выпадениях, пассивный сбор которых выполнен с помощью специального пробоотборника – импульвератора, где в качестве сорбента использован химически инертный оксид алюминия в виде порошка.

Схема устройства для пассивного пробоотбора аэрозолей представлена на рис. 1. Устройство включает корпус, выполненный из материала, обладающего высокой теплоемкостью и химически инертного к атмосферным компонентам. Его верхняя часть закрыта глухой крышкой (1), снабженной выступом-козырьком (2), под которым сделаны отверстия (3). К открытой нижней части импульвератора крепится нейлоновая сетка (5). Внутрь устройства устанавливается ложемент (4), на который помещается сорбент из химически инертного порошкового материала. Экспонирование устройств осуществляется с помощью специальной конструкции (рис. 2).

Пассивный сбор радионуклидов осуществлен на ключевом участке «РБК» с помощью импульвератора, в котором в качестве сорбента использовался химически инертный тонкодисперсный порошок Al_2O_3 (марки ХЧ). Порошок насыпáли тонким слоем на ложемент (до 5 г). Схема наблюдений по динамике сухого осаждения радионуклидов в пределах ключевого участка предусматривала два этапа. Первый продолжался три месяца (05.2009–07.2009 г), длительность второго составила более года (05.2009–05.2010 г.). В качестве контроля использовался неэкспонированный порошок оксида алюминия.

Определение урана осуществлялось с использованием люминесцентного метода [18], торий определяли фотоколориметрически [19], а радий – эманационным методом [20]. Все определения производились в аккредитованной лаборатории миграции радионуклидов и радиохимии Института биологии Коми НЦ УрО РАН.

Рис. 1. Схема импульвератора с химически инертным субстратом из порошкового материала (пояснения в тексте)

Результаты и их обсуждение

Анализ результатов экспонированных образцов показал, что с увеличением продолжительности экспонирования наблюдается ослабление сигнала удельной активности для ^{238}U, ^{232}Th, ^{226}Ra (таблица 1).

Возможно, что это обусловлено соосаждением радиоактивных и неактивных (пыли) аэрозольных частиц, которое приводит к изменению объемной активности радиационной пробы. При таком совместном соосаждении излучение, испускаемое радиоактивной частицей, частично поглощается дисперсными минеральными частицами. Подобный механизм ослабления радиационного сигнала вполне возможен [21].

Следует отметить, что механизм усиления и ослабления сигнала пассивного накопления радионуклидов в обоих случаях связан с действием капиллярных сил. В предложенном способе пассивного пробоотбора радиоактивных аэрозолей проявление действия капиллярных сил обеспечивается следующим.

Из-за различий в теплоемкости материалов депонирующего субстрата и устройства при воздействии солнечной радиации во в его внутреннем объеме возникает температурный градиент, сопровождающийся формированием конвективных и турбулентных потоков воздуха и, как следствие, появлением пограничного слоя над субстратом. В результате турбулентной диффузии из пограничного слоя на поверхность химически инертного субстрата аэрозоли осаждаются.

К механизму осаждения радиоактивных аэрозолей в пограничном слое. Известно, что скорость сухого осаждения аэрозольных частиц диаметром 0,1–10,0 мкм не зависит от силы тяжести и определяется только градиентом температур и концентраций в пограничном слое [6]. Пограничный слой появляется при обтекании воздушным потоком препятствия [22] (например, листа растения). Если на внешней границе этого слоя скорость обозначить через v, то в пограничном слое скорость воздушного потока резко падает от v до 0. Данное снижение происходит за счёт трения о поверхность. В зависимости от распределения скорости v пограничный слой может быть турбулентным и ламинарным. В турбулентном пограничном слое скорость воздушного потока распределяется нелинейно, в ламинарном – линейно: от 0 на твердой поверхности до v на границе слоя с воздушным потоком. Вне зависимости от степени шероховатости поверхности между ламинарным потоком и твердой поверхностью располагается буферный подслой с нулевой скоростью воздушного потока. Считается, что благодаря наличию шероховатости поверхности буферный подслой с нулевой скоростью воздушного потока сохраняется при любом ускорении ветра в виде небольшого подслоя у твердой поверхности. Механизм осаждения аэрозольных частиц в данном подслое обусловлен следующим. Поскольку воздух прозрачен для солнечной радиации, то его температура зависит от нагрева частиц; нагрев, в свою очередь, – от интенсивности солнечной радиации. Следовательно, чем больше частиц в пограничном слое, тем выше его температура, тем активней в нем идет молекулярное перемешивание (молекулярная диффузия): при нагреве частиц часть их кинетической энергии передается молекулам воздуха. При этом число соударений возрастает, и частицы могут контактировать с поверхностью и удерживаться на ней. Силы, которые обеспечивают такой контакт, называются адгезией [23]. Адгезии всегда предшествует адсорбция, которая сопровождается изменением концентрации вещества на границе раздела фаз. Процесс идет на различных межфазовых поверхностях и адсорбироваться могут любые вещества. При этом адсорбционное равновесие, т.е. равновесное распределение вещества между пограничным слоем и граничащими фазами, является динамичным равновесием и быстро устанавливается.

Между тем, в результате молекулярной диффузии в пограничном слое частицы могут контактировать не только с поверхностью, но и между собой. При этом между частицами возникает связь, которая называется аутогезией. Если силы взаимодействия между двумя частицами больше, чем при взаимодействии между частицей и поверхностью, то силы аутогезии начинают доминировать и частицы укрупняются. При этом удержание частиц в образующихся агрегатах как на листовой поверхности, так и в диффузном слое с нулевой скоростью происходит за счет действия капиллярных сил. В этом случае на осаждение частиц в диффузном слое начинают влиять уже силы гравитации.

В обоих случаях удержание частиц в зоне контакта будет обусловлено действием капиллярных сил. Проявление действия капиллярных сил при агрегации (укрупнении) частиц и их взаимодействии с поверхностью химически инертного субстрата свя-

Таблица 1. Сравнительная оценка удельной активности естественных радионуклидов в стоке аэрозолей, Бк/кг

Период экспонирования Al_2O_3	^{226}Ra	^{232}Th	^{238}U
05.2009–07.2009	14,0 ± 2,0	2,4 ± 0,5	1,8 ± 0,4
05.2009–05.2010	10,0 ± 1,5	0,3 ± 0,06	0,12 ± 0,03
Контроль (фон)	13,0 ± 1,7	1,5 ± 0,3	0,09 ± 0,02

зано с образованием прослойки жидкости. Появление последней реализуется за счет капиллярной конденсации, т. е. конденсации паров в жидкость при давлении, которое меньше давления насыщенного пара. Наблюдения Х. Юнге [1] за образованием частиц Айткена в камере Вильсона показали, что капиллярная конденсация появляется после достижении относительной влажности 40 %. В природных условиях появление капиллярной жидкости на листовой поверхности фиксировалось при относительной влажности воздуха более 50 % [24].

Предполагается, что выявленное в настоящей работе заглушение сигнала накопления радиоактивных аэрозолей связано с сухим соосаждением неактивных минеральных частиц. Их наслоения удерживаются за счет аутогезии. В условиях запыленности атмосферы снижение сигнала радионуклидов будет определяться именно аутогезией.

Заключение

В условиях запыленности атмосферы колебания природного радиационного фона могут маскироваться соосаждением радиоактивных и нерадиоактивных аэрозольных частиц. При этом данное изменение происходит в результате частичного поглощения излучения неактивными пылевыми частицами. Интенсивность этого поглощения будет контролироваться степенью запыленностью приземной атмосферы: чем она выше, тем слабее сигнал.

На основании полученных результатов может быть определен спектр радиоэкологических задач, решаемых с помощью описанного способа пассивного сбора радиоактивных аэрозолей, а именно: а) организация наблюдений за динамикой изменчивости концентраций радионуклидов при сухом осаждении аэрозолей в наземные экосистемы в пределах территорий, прилегающих к предприятиям атомной промышленности; б) изучение влияния природно-климатических условий на особенности формирования радиационных аномалий в приземной атмосфере.

Предложенный способ пассивного пробоотбора радиоактивных аэрозолей дает возможность по-новому организовать контроль за радиологической обстановкой в зоне техногенеза и на фоновых территориях. Простота конструкции устройства и низкие затраты на изготовление пассивного пробоотборника аэрозолей позволяют использовать его для одновременного сбора сухих аэрозолей в различных ландшафтных условиях и на большой площади, что, в отличие от существующих способов, повышает качество и технологичность исследований атмосферного цикла миграции радионуклидов, например, в отдаленных и труднодоступных районах.

Автор выражает глубокую признательность своим коллегам И. И. Шуктомовой, В. М. Гляд и Т. И. Музакка за помощь и консультации при подготовке данной работы.

Литература

1. Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы / Х. Юнге. – М.: Мир, 1965. – 424 с.
2. Ивлев Л. С. Аэрозольное воздействие на климатические процессы / Л. С. Ивлев // Оптика атмосферы и океана, 2011. – Т. 24. – № 5. – С. 392–410.
3. Mahowald N. M. Observed 20th century desert dust variability: impact on climate and biogeochemistry / N. M. Mahowald, S. Kloster, S. Engelstaedter et al. // Atmos. Chem. Phys., 2010. – № 10. – P. 10875–10893. doi:10.5194/acp-10-10875-2010.
4. Лисицын А. П. Аридная седиментация в мировом океане. Рассеянное осадочное вещество атмосферы / А. П. Лисицын // Геология и геофизика, 2011. – Т. 52. – № 10. – С. 1398–1439.
5. Смирнов В. В. Аэрозольный климат Подмосковья / В. В. Смирнов // Метеорология и гидрология, 2003. – № 9. – С. 37–49.
6. Хорват Л. Кислотный дождь / Л. Хорват. – М.: Стройиздат, 1990.– 80 с.
7. Райст П. Аэрозоли / П. Райст. – М., Мир, 1987. – 280 с.
8. Елпатьевский П. В. Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах / П. В. Елпатьевский. – М.: Наука, 1993. – 253 с.
9. Евгеньев М. И. Пассивный химический дозиметр для определения длительной экспозиции в воздушной среде, содержащей анилин и его производные / М. И. Евгеньев, И. И. Евгеньева, П. Е. Белов // Журнал аналитической химии, 2006. – Т. 61. – № 8. – С. 847–853.
10. Юшкетова Н. А. Метод пассивного отбора проб для мониторинга химического загрязнения атмосферного воздуха. Ч. 1. Теоретические основы (обзор) / Н. А. Юшкетова, В. А. Поддубный // Экологические системы и приборы, 2007. – № 2. – С. 3–10.
11. Palmes E. D. Personal monitoring device for gaseous contaminants / E. D. Palmes, A. F. Gunnison // American Industrial Hygiene Assoc. J., 1973. – V. 34. – P. 78–81.
12. Palmes E. D. Personal sampler for nitrogen dioxide / E. D. Palmes, A. F. Gunnison, J. DiMattio, C. Tomczyk // American Industrial Hygiene Assoc. J., 1976. – V. 37. – P. 570–577.
13. Giese U. Passive sampling / U. Giese, R. Hebisch, K.-H. Pannwitz, M. Tschickardt // Analyses of Hazardous Substances in Air, 2002. – V. 6. – P. 3–25. doi: 10.1002/3527600418.amsamppassive0006.
14. Kot-Wasik A. Advances in passive sampling in environmental studies / A. Kot-Wasik, B. Zabiega-

laa, M. Urbanowicza, E. Dominiaka, A. Wasika, J. Namiesnika // Analytica Chimica Acta, 2007. – V. 602. – № 2. – P. 141–163. doi:10.1016/j.acta.2007.09.013.
15. Wagner J. Field tests of a passive aerosol samples / J. Wagner, D. Leith // J. Aerosol Science, 2001. – V. 32. – № 1. – P. 33–48.
16. Kreissl B. Meteorological influence on particle dry deposition / B. Kreissl, K. Hoschele, H. Staiger, E. Schultz // J. Aerosol Science, 1991. – V. 22. – № 1. – P. 573–576. doi:10.1061/S0021-8502(05)80166-1.
17. Delcourt J. Performance assessment of a passive sampler in industrial atmospheres / J. Delcourt, J.-P. Sandino // International Archives of Occupational and Environmental Health, 2000. – V. 74. – № 1. – P. 49–54.
18. Добролюбская Т. С. Люминесцентный метод / Т. С. Добролюбская. – Аналитическая химия урана. – М.: Наука, 1962. – С. 143–165.
19. Кузнецов В. И. Чувствительное фотометрическое определение тория с реагентом арсеназо III / В. И. Кузнецов, В. Б. Савин. – Радиохимия, 1961. – Т. 3.– № 1. – С. 79–86.
20. Старик И. Е. Основы радиохимии / И. Е. Старик. – Л.: Наука, 1969. – 247 с.
21. Рузер Л. С. Радиоактивные аэрозоли / Л. С. Рузер. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 230 с.
22. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – 3 изд. – М.: Наука, 1970. – 823 с.
23. Зимон А. Д. Что такое адгезия / А. Д. Зимон. – М.: Наука, 1983. – 176 с.
24. Burkhardt J. Thin water films on coniferous needles: A new device for the study of water vapour condensation and gaseous deposition to plant surfaces and particle samples / J. Burkhardt, R. Eiden // Atmospheric Environment, 1994. – V. 28 (12). – P. 2001–2011. doi.org/10.1016/1352-2310(94)90469-3.

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТИВНОГО ГОРИЗОНТА В ОБЛАСТИ ДВУХСКВАЖИННОГО ОПЫТА ПВ-89 НА ДОБРОВОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ УРАНА: НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Т. С. Теровская[1], Г. И. Авдонин[2], А. Г. Кеслер[1], Ю. И. Лаптев[3], М. Д. Носков[1]

[1]Северский технологический институт НИЯУ МИФИ
Северск, Россия, tsterovskaya@mail.com
[2]ФГБУ «ВИМС»
Москва, Россия, vims@vims-geo.ru
[3]АО «Далур»
Уксянское, Россия, yilaptev@rosatom.ru

CHANGE OF THE PRODUCTIVE HORIZON STATE IN THE AREA OF TWO-WELL EXPERIMENT PV-89 AT THE DOBROVOLNOE URANIUM DEPOSIT: OBSERVATIONS AND MODELING

T. S. Terovskaya[1], G. I. Avdonin[2], A. G. Kesler[1], U. I. Laptev[3], M. D. Noskov[1]

[1]Seversk Technological Institute NRNU MEPhI
Seversk, Russia, tsterovskaya@mail.com
[2]FSBI "VIMS"
Moscow, Russia vims@vims-geo.ru
[3]JSC "Dalur"
Uksyanskoe, Russia yilaptev@rosatom.ru

The analysis of changes of the productive horizon state in the area of two-well experiment PV-89 at the Dobrovolnoye uranium deposit was carried out based on the results of the study of core samples and water extracts of the control well and mathematical modeling. An assessment of the self-cleaning ability of the geological environment concerning residual sulfuric acid solutions formed because of uranium mining by the in situ leaching method was made.

Введение

Добровольное месторождение урана расположено в Звериноголовском районе Курганской области. Добычу урана на месторождении планируется осуществлять методом сернокислотного скважинного подземного выщелачивания (СПВ). Важным условием добычи урана методом СПВ являются обеспечение экологической безопасности разработки месторождения. Поэтому на стадии проектирования отработки месторождения целесообразно оценить

защитные геохимические свойства пород продуктивного горизонта по отношению к остаточным технологическим сернокислым растворам, образующимся в результате добычи урана методом СПВ. Для оценки автоочищающей способности геологической среды были выполнены исследования керна контрольных скважин в области двухскважинного опыта ПВ-89 на Добровольном месторождении и проведено математическое моделирование изменения состояния продуктивного горизонта.

Материалы и методика проведения исследований

Добровольное месторождение урана было выявлено в 1986 году в Зауральском рудном районе. Месторождение локализовано в палеоаллювиальных отложениях средне-верхнеюрского возраста, выполняющих депрессионную эрозионную структуру (Убаганскую палеодолину) в породах кристаллического фундамента, залегающих на глубинах 480–600 м от земной поверхности [1, 2]. Содержание урана в песках составляет 3,1–5,2 г/т, в глинах – 5,3–10,2 г/т. Руды представляют собой первично сероцветные породы, богатые органическим веществом и дисульфидами железа [2]. Основными породообразующими минералами являются кварц, калиевый полевой шпат, каолинит, мусковит, иллит.

Продуктивный водоносный горизонт относится к зоне затруднённого водообмена. Скорость движения подземных вод составляет первые сантиметры в год. Литологически водовмещающая толща представлена аллювиальными и пролювиальными образованиями. Ритмично чередующиеся прослои разнозернистых песков, песчаников и гравийно-песчаных отложений разделены глинистыми водоупорами, имеющими переменную мощность. Воды рудоносного комплекса по условиям залегания – межпластовые напорные, водопроводимость пласта колеблется от 11,6 м^2/сутки до 195,8 м^2/сутки, средний коэффициент фильтрации от 3,6 до 15,2 м/сутки. Воды, преимущественно, солёные, с минерализацией 11,1–13,0 г/л. В составе макрокомпонентов преобладают хлориды натрия. Значение окислительно-восстановительного потенциала в водах изменяется от +60 до +120 мВ. Содержание урана в воде достигает $7{,}8 \cdot 10^{-6}$ г/л, при фоновых концентрациях в горизонте $1 \cdot 10^{-6}$ г/л.

В 1990 году на Добровольном месторождении урана было проведено геотехнологическое опробование по двухскважинной схемес целью определения прогнозных геотехнологических показателей отработки месторождения. Полигон опытного геотехнологического опробования включал в себя пять скважин: Т-1 – откачная, Т-2 нагнетательная, Т-3 –поглощающая, Г-8 – водоснабженческая, Г-9 – наблюдательная. Схема расположения скважин приведена на рис. 1.

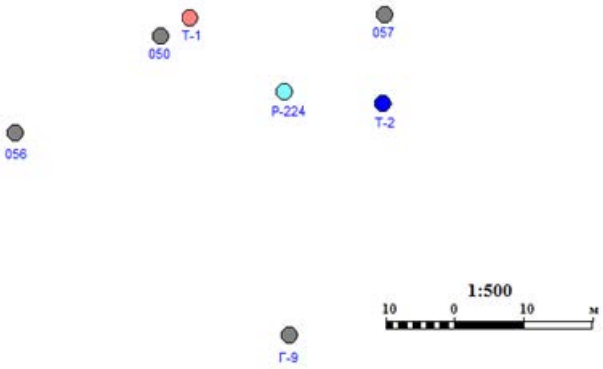


Рис. 1. Схема расположения скважин на полигоне опытного геотехнологического опробования

Опыт проводился с 06.01.1990 по 23.09.1990 по схеме В. А. Грабовникова [3], дебит откачной скважины превышал дебит закачной скважины в 5 раз. Первые два месяца испытаний концентрация кислоты в выщелачивающем растворе составляла около 10 г/л. С третьего по пятый месяцы концентрация поддерживалась на уровне 20 г/л. Затем концентрацию увеличили до 30 г/л. На завершающей стадии опыта средняя концентрация кислоты составляла 40 г/л. В процессе опыта были достигнуты следующие геотехнологические показатели: величина Ж/Т достигла 0,94; кислотная проработка руды – 8,9 кг/т; извлечение урана - 26,1%; средняя концентрация урана в откачных растворах составила 99 мг/л[2].

С 16.07.2020 по 21.07.2020 года на участке двухскважинного опыта ПВ-89 на Добровольном месторождении между откачной и закачной скважинами была пробурена контрольная скважина Р-224 (рис. 1). При бурении контрольной скважины проведен отбор керновых проб в интервале от кровли до подошвы продуктивного водоносного горизонта. Химический состав пород и руд определялся полуколичественным рентгено – спектральным анализом и химическим силикатным анализом. Минералого-аналитические исследования включали традиционные и прецизионные методы: авторадиографию штуфов для определения характера распределения урановой минерализации; петрографическое изучение шлифов горных пород с целью установления их минерального состава; рентгенографический фазовый анализ. Также были проведены исследования на рентгеновском микроанализаторе, укомплектованном энергодисперсионной приставкой и на электронном растровом микроскопе. Анализ состава водных вытяжек проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Микробиологические исследования проводились с использованиемикроорганизмов с помощью посева на элективные питательные среды. Численность микроорганизмов определялась методом предельных разведений в двукратной повторности.

Математическое моделирование изменения состояния продуктивного горизонта в процессе и после завершения двухскважинного опыта проводилось с помощью специализированной информационно-моделирующей системы, предназначенной для решения геоэкологических задач при разработке месторождений урана способом СПВ [4, 5]. Разработанное программное обеспечение основано на математической модели, описывающей изменение напоров в водоносном горизонте, фильтрацию жидкости и связанный с ней конвективный массоперенос, гидродинамическую дисперсию, комплексообразование, ассоциацию-диссоциацию кислот, сорбцию, выпадение осадков, растворение и переотложение минералов, гомогенные и гетерогенные окислительно-восстановительные процессы.

Результаты и обсуждение

Моделирование изменения состояния продуктивного горизонта в процессе и после завершения двухскважинного опыта проводилось на основе сопряжённой трёхмерной геолого-гидрогеологической модели. Модель была создана на основе данных, полученных при сооружении скважин полигона

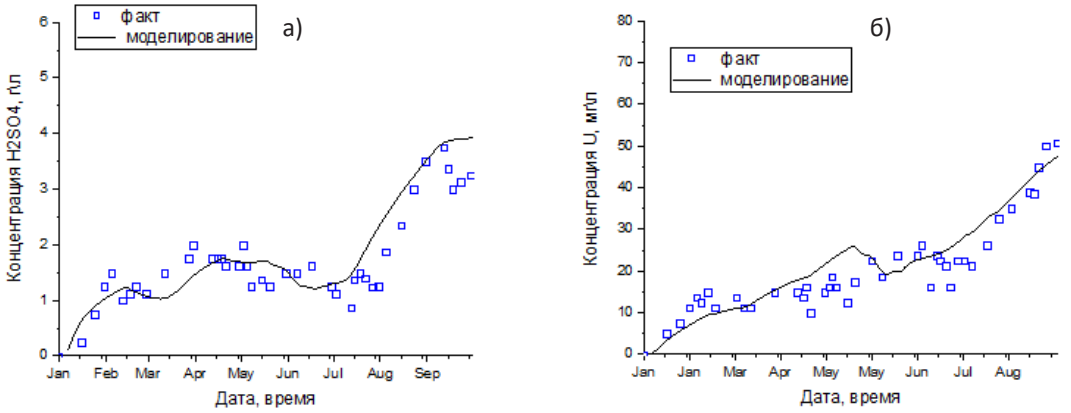


Рис. 2. Сравнение фактической концентраций серной кислоты (а) и урана (б) в откачных растворах скважины Т-2 с результатами моделирования

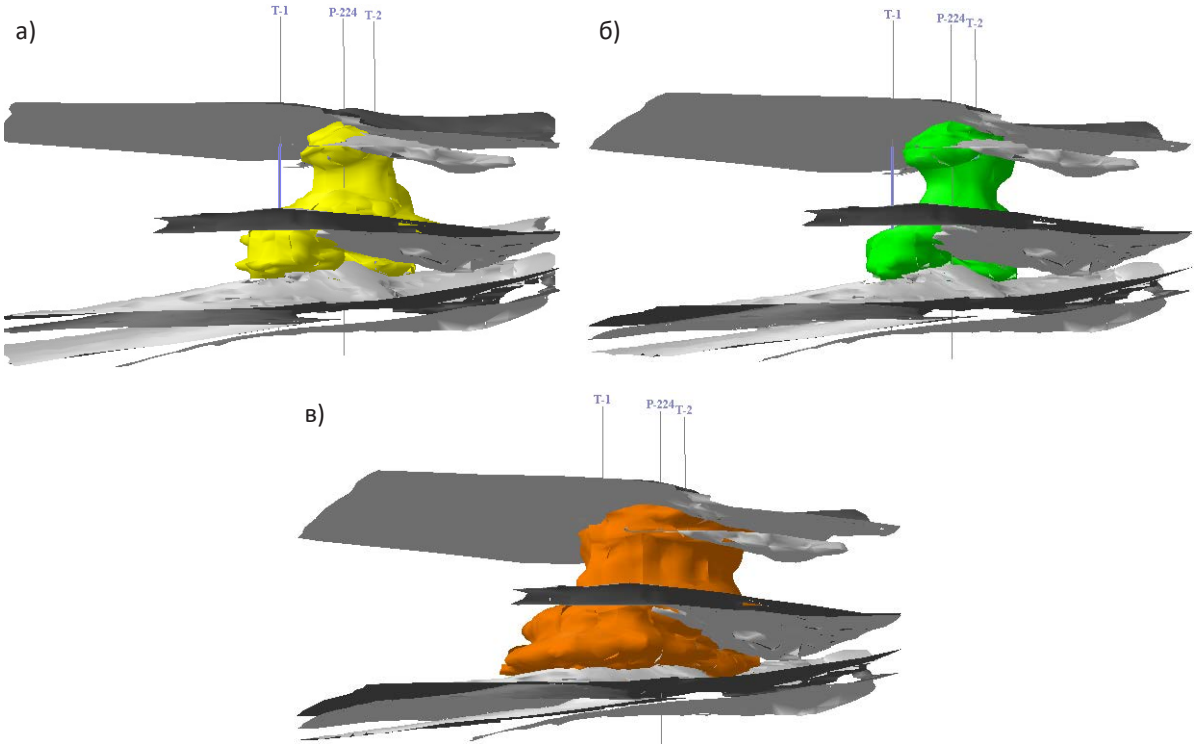


Рис. 3. Изоповерхности концентрации (а) урана по уровню 30 мг/л, (б) кислоты по уровню 1 г/л, (в) сульфат-иона по уровню 0,5 г/л в области двухскважинного опыта на 06.10.1990

Серым цветом показаны границы непроницаемых пропластков, а также перекрывающего и подстилающего водоупоров по значению проницаемости 1 м/сут. Отношение масштабов в горизонтальном и вертикальном направлениях 1 : 3.

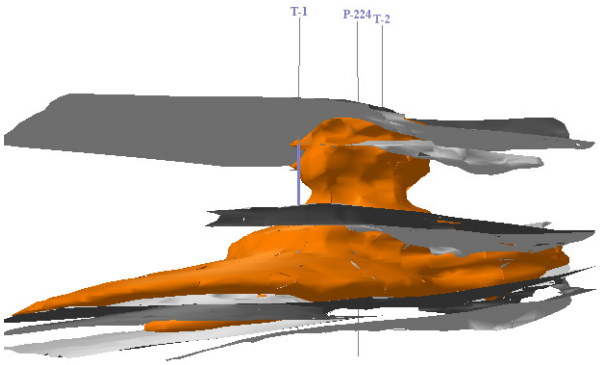


Рис. 4. Изоповерхность концентрации сульфат-иона по уровню 1 г/л на 07.2020, отношение масштабов в плане и разрезе 1 : 3

опытного геотехнологического опробования, а также разведочных скважин 050, 056, 057 (рис. 1). Область моделирования включала в себя участок продуктивного горизонта, а также прилегающие к нему части перекрывающего и подстилающего водоупоров. Расчёты проводилось с использованиемреальных дебитов скважин и состава выщелачивающего раствора. Сравнение рассчитанных и фактических временных зависимостей концентрации урана и концентрации серной кислоты в откачных растворах скважины Т-2 приведены на рисунке 2.

В процессе проведения двухскважинного опыта ПВ-89 в продуктивном горизонте образовалась область остаточных технологических сернокислых растворов, содержащая, кроме нагнетаемой серной кислоты, также уран и продукты взаимодействия кислоты с минералами вмещающей породы. Общая минерализация остаточных технологических сернокислых растворов превысила 30 г/л. На рисунке 3 с помощью поверхностей равной концентрации на 3D сценах показаны результаты моделирования распределения концентрации урана, серной кислоты и сульфат-иона на момент завершения двухскважинного опыта.

В первое время после завершения опытных работ, в результате взаимодействия серной кислоты с кислотопоглощающими минералами происходит увеличение величины pH раствора или водородного показателя (нейтрализация кислоты) и выход в раствор петрогенных металлов: алюминия, железа, магния, кальция, калия и др. Затем, по мере нейтрализации серной кислоты, происходит выпадение гидроокислов урана, железа, алюминия, и их концентрации в остаточных растворах снижаются. Также, процесс самоочистки происходит за счет сорбции загрязняющих компонентов на глинистых минералах. В результате взаимодействия содержащихся в остаточных растворах сульфат иона, кальция, калия, алюминия, происходит образование гипса, алюминита и алунита. При этом гипс и алюминит образуется во всей области остаточных технологических растворов, а алунит, преимущественно, на границе между остаточными растворами и пластовыми водами. Одновременно с кислотно-основными процессами в продуктивном горизонте протекают окислительно-восстановительные процессы между остаточным технологическим раствором и содержащимся в породе органическим веществом. По мере увеличения

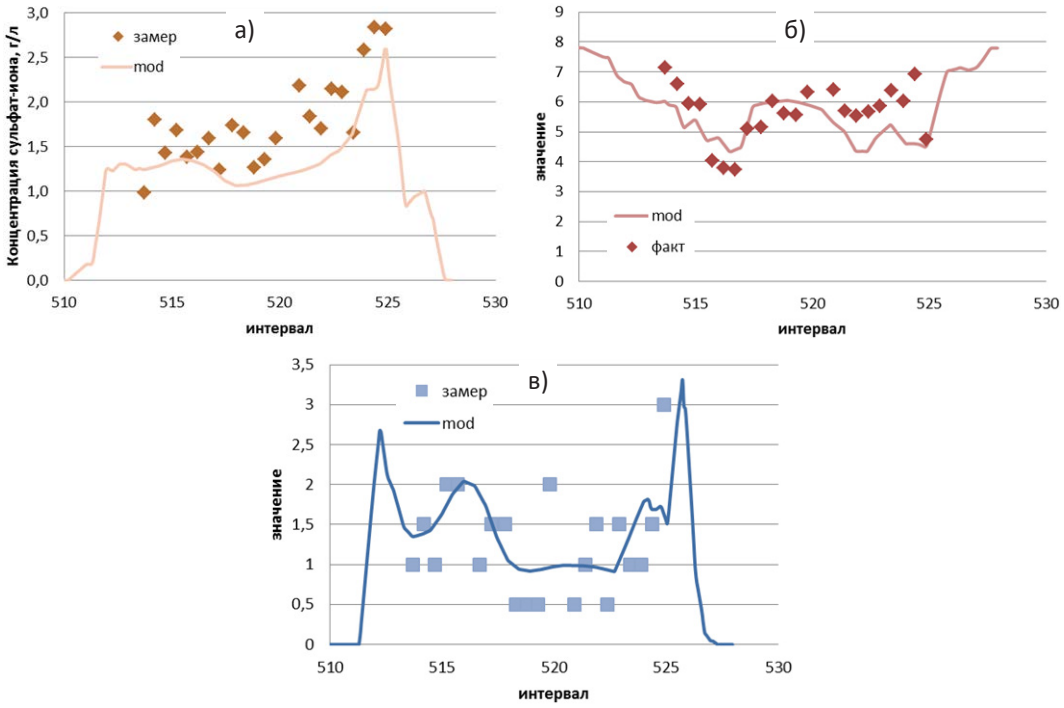


Рис. 5. Распределение (а) концентрации сульфат-иона, (б) значения pH и содержания гипса в породе в интервале вскрытия продуктивного горизонта контрольной скважиной Р-224

значения водородного показателя pH и понижения Eh среды ниже +150 мВ начинается восстановление сульфат-иона присутствующими в пласте сульфатредуцирующими бактериями. В результате происходит образование дисульфида железа.

Следует отметить, что низкая скорость движения подземных вод в рудоносных горизонтах на Добровольном месторождении (сантиметры в год), не способствует распространению техногенных растворов, и процесс нейтрализации происходит, преимущественно, в исходной области остаточных растворов. Кроме того, наблюдается смещение остаточных растворов в направлении подстилающего водоупора в результате действия гравитационных сил. При этом, происходит разбавление остаточных технологических растворов пластовыми растворами, содержащимися в слабопроницаемых пропластках.На рисунке 4 с помощью поверхностей равной концентрации на 3D сцене показаны результаты моделирования распределения сульфат-иона на момент бурения контрольной скважины Р-224.

На рисунке 5 приведены результаты моделирования и измерений концентрации сульфат-иона, значений водородного показателя pH и содержания гипсав интервале вскрытия продуктивного горизонта контрольной скважиной Р-224.

Таким образом, данные контрольного бурения и математического моделирования показывают, что в результате протекания процессов самоочистки за тридцать лет, прошедших после завершения двухскважинного опыта ПВ-89 на Добровольном месторождении, в значительной степени произошло самовосстановление геологической среды по отношению к остаточным сернокислым растворам: концентрация серной кислоты снизилась в тысячи раз, минерализация технологических растворов уменьшилась на порядок, концентрация урана практически равна фоновым значениям.

Заключение

Анализ данных лабораторных исследований керна и результатов моделирования изменения состояния продуктивного горизонта в результате проведения двухскважинного опыта ПВ-89 на Добровольном месторождении позволяет сделать вывод, что основными механизмами самоочистки геологической среды, по отношению к остаточным сернокислым растворам, являются:

- нейтрализация кислоты алюмосиликатными минералами, содержащимися в рудовмещающей породе в достаточном количестве, и выпадение в осадок радиоактивных и петрогенных компонентов в результате гидролиза;
- уменьшение окислительно-восстановительного потенциала остаточных технологических растворов в результате взаимодействия с содержащимся в продуктивном горизонте органическим веществом и деятельности сульфатредуцирующих бактерий;
- деминерализация остаточных технологических растворов в результате новообразования минералов (гипс, пирит, алунит,алюминит и др.);
- сорбция загрязняющих компонентов на глинистых минералах, содержащихся в рудовмещающей породе в достаточном количестве;
- разбавление остаточных технологических растворов пластовыми водами, при смещении линзы остаточных растворов вследствие регионального потока и гравитационного опускания.

Литература

1. Машковцев Г. А. Уран российских недр /Машковцев Г. А., Константинов А. К., Мигута А. К., Шумилин М. В., Щеточкин В. Н. – М.: ВИМС, 2010. – 850 с.
2. Отчет Тургайской партии № 89 о результатах предварительной разведки Добровольного рений-редкоземельно-уранового месторождения в Северном / «ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА»/ рук. Дементьев П. К. – М., 1991. – Книга IV. – 94 с.
3. Грабовников В. А. Геотехнологические исследования при разработке металлов. – М.: Недра, 1995. – 155 с.
4. Моделирование геоэкологического состояния месторождений АО «Далур», разрабатываемых способом подземного выщелачивания: свидетельство орегистрации программ для ЭВМ № 2016610552 Рос. Федерация, А. С. Бабкин, А. Д. Истомин, А. Г. Кеслер, М. Д. Носков, Т. С. Теровская, А. А Чеглоков; заявитель и патентообладатель АО «Далур».– № 2015661283; заявл. 23.11.15; опубл. 14.01.16.
5. Теровская Т. С., Кеслер А. Г., Носков М. Д. Математическая модель изменения состояния продуктивного горизонта при сернокислотном скважинном выщелачивании урана// Изв. вузов. Физика, 2021. – Т. 64. – № 2/2. – С. 119–124.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА МИГРАЦИЮ УРАНА И ТОРИЯ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ НА ОСНОВЕ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА

А. С. Торопов

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, Россия, torop990@gmail.com

ASSESSMENT OF HYDROGEOCHEMICAL PARAMETERS ON MIGRATION URANIUM AND THORIUM IN NATURAL WATERS BASED ON FACTOR ANALYSIS

A. S. Toropov

Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia, torop990@gmail.com

The paper focuses on determining the influence of the physical and chemical parameters of water on the distribution of natural radionuclides – uranium and thorium in water, the ratio of their suspended, colloidal and dissolved forms on the territory of the Semipalatinsk test site, where various geochemical conditions are clearly expressed. Based on the principal components analysis, the geochemical factors that determine the composition of water and the features of the migration of radionuclides in them are ranked as: metamorphization of water types as a result of evaporation processes > redox characteristics, water-rock interaction and oxidation of sulfide minerals > accumulation of organic matter and iron in water > supply of terrigenous material, sorption of thorium on suspended matter.

Введение

Широко известно, что основными параметрами, влияющими на миграционный процесс радионуклидов в гидрогеохимических системах, являются формы их нахождения и ландшафтно-геохимические условия природной среды. Наличие большого объема информации о каждом конкретном объекте, где изучаются формы миграции радиоактивных элементов, не облегчает задачу поиска ведущих факторов, определяющих перенос радионуклидов. На сегодняшний день использование многомерной статистики вышло за рамки поисковой геохимии и активно применяется для научных задач (Rollinson, 2014). Отсутствие четких связей между гидрогеохимическими параметрами и формами нахождения радионуклидов при анализе массивов данных подтолкнуло обратиться к методам многомерной статистики для поиска скрытых геохимических зависимостей и более корректной их интерпретации.

Целью данной работы было изучение влияния гидрогеохимических параметров на распределение урана и тория, а также форм их нахождения на примере природных вод Семипалатинского испытательного полигона (СИП) методом факторного анализа.

Материалы и методы

Объектом исследования выбрана территория СИП, Казахстан, которая достаточно уникальна в плане сочетанного влияния техногенных факторов (ядерные испытания, эксперименты с радиоактивными веществами), а также природных – регион относится к урановой провинции, а некоторые локальные места (например, долина ручья Карабулак) – к урановым аномалиям. Тем не менее, миграция естественных радионуклидов (урана и тория) в гидрогеохимических системах с учетом форм их нахождения осталась слабо изучена в данном регионе. В частности, в отношении форм нахождения природных радионуклидов, имеются лишь отдельные сведения о соотношении изотопов урана в колодезных водах СИП (Vintro et al., 2009).

На фоне большого разнообразия гидрогеохимических обстановок (особенности рельефа, разгрузка подземных вод на поверхность, наличие горного массива, замкнутых водоемов различной глубины) поведение радионуклидов будет специфичным в каждом конкретном случае. На данной территории имеются природные воды самого различного состава – от пресных до соленых, богатые и бедные по растворенному органическому веществу. При этом концентрация урана и иногда тория превышает кларковые значения.

Всего изучено 19 объектов, относящихся к основным площадкам СИП: «Опытное поле» (воронками наземных взрывов, заполненные водой), «Телькем», «Балапан» (искусственные озера, образованные в результате экскавационных взрывов), «Дегелен» (испытательные штольни выработанные в горном массиве, имеющие водопроявление, а также ручьи).

Результаты и их обсуждение

Изученные водные объекты по значению pH изменялись в широких пределах – от 5,9 до 8,4, редокспотенциала (ESHE) – от 170 до 420 мВ. pH вод ручьев и основного числа штолен нейтральный, а водоемов Телькем-1, Телькем-2, Атомного озера, ручья Карабулак и штолен № 176, № 177 и № 609 – слабощелочной. Воды штольневых водотоков и ручьев СИП относятся преимущественно к пресным. Вода водоемов В-1 и озера Телькем 2 относятся к солоноватым водам (1960 и 8950 мг/л соответственно). Воды озера Телькем-1 (20520 мг/л), Атомного озера и реки Чаган (12380 и 13000 мг/л соответственно) – к соленым водам. Более подробно химический состав изученных объектов охарактеризован в работе (Торопов и др., 2020).

Состав подземных вод ручьев рассматриваемых штолен с водопроявлением формируется преимущественно под влиянием процессов выщелачивания минералов водовмещающих пород и окисления сульфидных минералов. Поверхностные водоемы исследуемого участка находятся в зоне влияния процессов континентального засоления. Содержание органических веществ в штольневых водах варьировало от 4 до 12 мг/л, в ручьях – от 10 до 16 мг/л, в водоемах площадок «Телькем» и «Балапан» было низким (до 10 мг/л), и лишь в воде водоема воронки В-1 достигало 35 мг/л.

Природные воды СИП содержат торий в диапазоне более двух порядков – от 0,012 мкг/л (р. Чаган) до 2,1 и 3,1 мкг/л (штольневые водотоки 504 и 511 соответственно). Содержание урана в изучаемых природных водах также изменяется в пределах двух порядков. При этом концентрация данного элемента в водоемах существенно меньше: от 5,5 мкг/л (В-1) до 66 мкг/л (Телькем-2). В ручьях горного массива Дегелен общее содержание урана составляет 60 и 81 мкг/л для ручьев Карабулак и Узынбулак соответственно. В штольневых водотоках урана существенно больше – от 39 (штольня 511) до 825 мкг/л (штольня 504) в среднем составляя 543 мкг/л.

Взвешенная форма доминирует в переносе как тория, так и урана (от 50 до 98 %). Доля переносимого со взвесями тория примерна одинаковая для ручьев и озер. В то время как для урана отмечена существенная разница. Процентная доля урана, мигрирующего в водах ручьев с частицами коллоидной размерности, примерно в три раза выше, чем в водоемах.

В геохимических исследованиях всегда стоит вопрос о том, насколько выраженно ландшафтно-геохимические условия среды влияют на интенсивность миграции микроэлементов. Однако из-за сочетанного действия факторов, иногда и разнонаправленных, оправдано применение факторного анализа. Распределение изученных гидрогеохимических параметров по величинам факторных нагрузок (метод главных компонент) представлено на рисунке 1. Всего было выделено 4 фактора, объясняющих 92 % дисперсии экспериментальных данных.

Анализ полученных закономерностей позволил обозначить основные факторы, определяющие химический состав и миграцию тория и урана в природных водах СИП:

- фактор 1 (44 % всей дисперсии): взаимосвязь главных компонентов химического состава вод, метаморфизация типов воды в результате испарительного концентрирования от гидрокарбонатного кальциевого до хлоридного натриевого;
- фактор 2 (24 %): окислительно-восстановительные процессы, изменение химического состава вод в процессе взаимодействия вода-порода, выщелачивание водовмещающих пород и окисления сульфидных минералов;

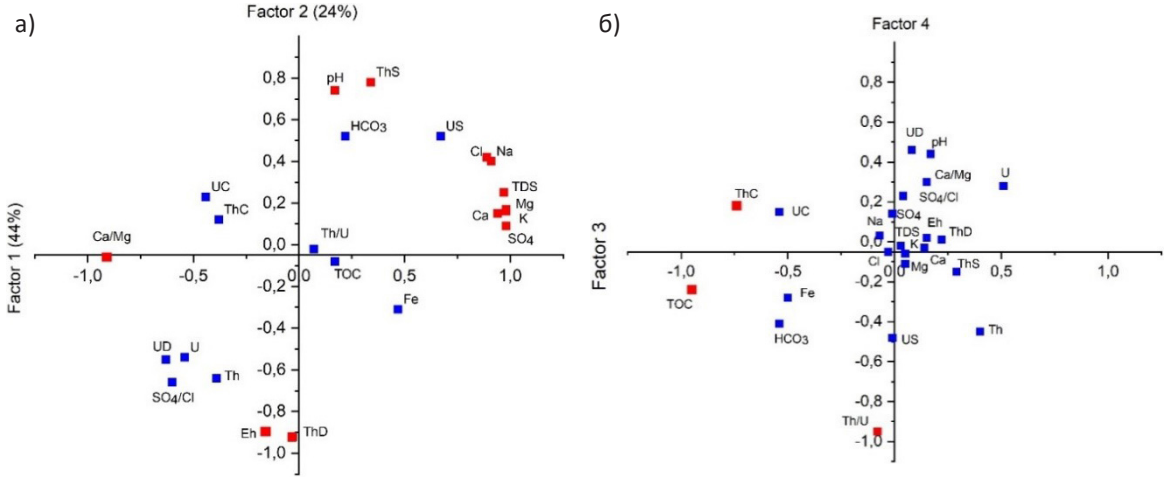


Рис. 1. Распределение факторных нагрузок по компонентам природных вод

а – факторы 1 и 2, б – факторы 3 и 4. Красным отмечены показатели с нормированной факторной нагрузкой выше 0,70 (порог достоверности), синим – ниже 0,7. В скобках по осям указана доля объясненной дисперсии, %. М – минерализация, Th(S, C, D), U(S, C, D) – взвешенные, коллоидные и растворенные формы тория и урана ТОС – общий органический углерод.

• фактор 3 (15 %): накопление в штольневых водотоках и ручьях органического вещества; обогащение вод железом и торием;

• фактор 4 (9 %): проявление влияния терригенной составляющей, сорбция тория на взвесях, изменение Th/U отношения.

Также выделяется четкая дифференциация водоемов и водотоков, поскольку механизмы формирования и направленность изменения химического состава таких вод различаются существенно.

Первый и второй факторы суммарно отражают основные закономерности, определяющие химический состав воды, и являются характерными для любых типов вод. При сопоставлении факторов друг с другом, выявлено, что первые два фактора прямо коррелируют со средней силой связи (r = 0,63), что говорит об их родственном генезисе. А третий и четвертый факторы отражают характерные особенности и специфику конкретных водных объектов. Третьим и четвертым фактором объясняется 24 % общей дисперсии, что на фоне ярко выраженного доминирующего влияния основного анионно-катионного состава вод, достаточно весомо. Видно, что накопление в воде тория сопряжено с поступлением терригенного материала, накоплением органических веществ гуминовой природы и железа.

Установлено, что отношения SO_4^{2-}/Cl^- и Ca/Mg являются независимыми параметрами, которые позволяют проследить особенности накопления радиоактивных элементов в зависимости от геохимической обстановки. Величины pH и Eh определяются единым фактором, с противоположным знаком. При этом, влияние окислительно-восстановительного потенциала более выражено. Несмотря на то, что распределение урана описывается недостаточно достоверно выбранными параметрами (все значения r < 0,7), отдельные гидрогеохимические параметры или их комбинации проявляются в других видах многомерного статистического анализа. Таким образом, сделан вывод о том, что миграция урана и распределение форм его нахождения обуславливается многофакторным воздействием.

Содержание тория, как и торий-урановое отношение в природных водах СИП выступают единым фактором. Осаждение тория в результате процессов сорбции, выпадения его малорастворимых соединений, захват коллоидными частицами ограничивают миграцию данного элемента. В паре U–Th именно свойства тория определяют изменение отношения данных элементов в воде. Коллоидные формы обоих изученных радионуклидов на карте факторных нагрузок находятся близко друг к другу для всех факторов. Вероятно, миграция коллоидной фракции урана и тория определяется одним механизмом, но слабо проявленным в изучаемых объектах, на фоне более четко проявленных и сильных факторов.

Заключение

Формы нахождения природных радионуклидов в водах СИП при изменении геохимических условий подвержены трансформации. Для тория в большей степени, чем для урана, характерна миграция в виде коллоидных частиц. Особенности миграции трансурановых радионуклидов в водах с контрастирующей гидродинамикой – ручьев и озер – четко проявлены в факторном анализе. Комплексная проработка исходных материалов и задействование мультивариативной статистики позволяет корректно обсуждать выявленные зависимости как полноценные закономерности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-60030.

Литература

1. Rollinson H. R. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. – New-York: Routledge, 2014. – 384 p.
2. Vintró L. Mitchell P. I., Omarova A., Burkitbayev M., Jiménez Nápoles H., Priest N. D. Americium, plutonium and uranium contamination and speciation in well waters, streams and atomic lakes in the Sarzhal region of the Semipalatinsk Nuclear Test Site, Kazakhstan. Journal of Environmental Radioactivity, 2009. – Vol. 100 (4). – P. 308–314.
3. Торопов А. С., Солдатова Е. А., Рихванов Л. П. Формы миграции радионуклидов (U и Th) в природных водах в различных геохимических условиях на основе расчетных и экспериментальных данных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 7–21.

ОТНОШЕНИЕ ИЗОТОПОВ УРАНА В ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ЗОН ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА ГОРНЫХ РЕК КАК ЕСТЕСТВЕННЫЙ ИНДИКАТОР ИХ ГЕНЕЗИСА

Т. В. Тузова

Институт водных проблем и гидроэнергетики Национальной академии наук
Бишкек, Кыргызская Республика, tuzova _tv@mail.ru

URANIUMS ISOTOPIC COMPOSITION IN THE SURFACE AND UNDERGROUND WATERS OF THE ZONES MOUNTAIN RIVERS FORMATION FLOW AS A NATURAL INDICATOR OF THEIR GENESIS

T. V. Tuzova

Institute of Water Problems and Hydropower of the National Academy of Sciences
Bishkek, Kyrgyz Republic, tuzova _tv@mail.ru

The results of the study of the uranium isotopic composition in the surface and underground waters of the areas Central Asias river basins flow formation are presented. Previously established genetic types of waters responsible for the water resources of mountain rivers have been confirmed. The proportions of glacial runoff, near-surface waters of the active water exchange zone and deep circulation waters in mountain massifs are estimated from nonequilibrium uranium. It is shown that it is necessary to organize monitoring of the isotopic composition of uranium in waters to control the radiological situation in connection with climate change and anthropogenic.

Введение

Для решения вопросов вододеления в странах Центральной Азии (ЦА) важно знать закономерности формирования водных ресурсов трансграничных рек. Зоны формирования стока этих рек расположены в приледниковых высокогорных районах, где практически отсутствует сеть гидрометрических наблюдений. В связи с этим актуальным является разработка нетрадиционных методов оценки генезиса и распределения водных ресурсов горных рек. Одним из таких методов является уран-изотопный, хорошо зарекомендовавший себя для решения ряда гидрогелогических задач ЦА [1–20]. Данная работа

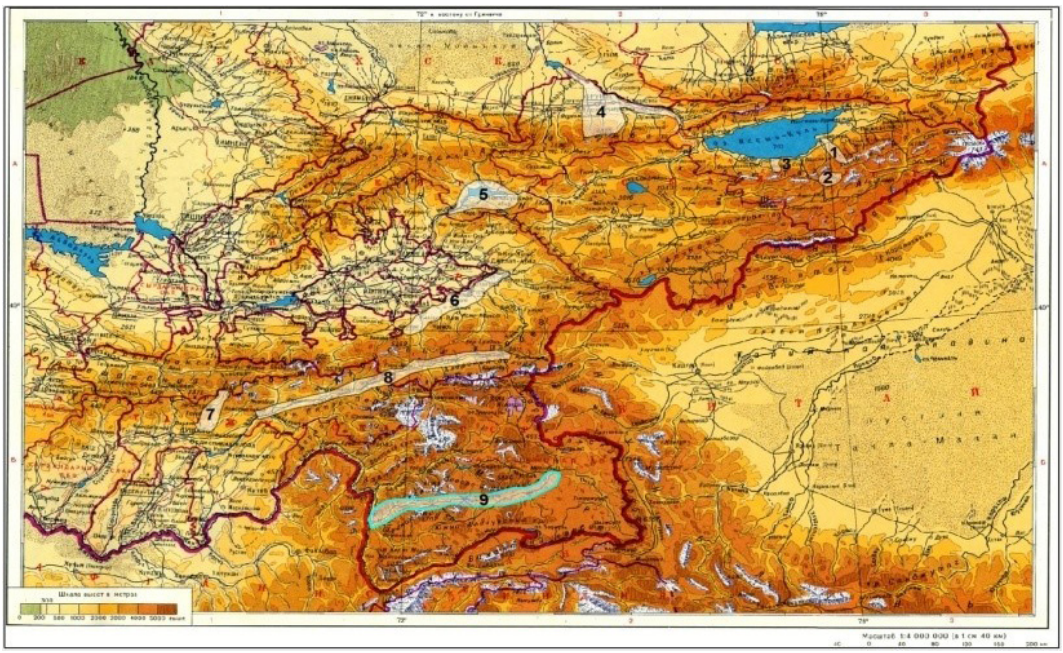


Рис. 1. Схема уран-изотопного опробования вод зон формирования стока трансграничных речных бассейнов ЦА

1–3 – Чон-Кызылсуу, Кумтор, Каджисай (Внутренний Тянь-Шань); 4 – Чу (Северный Тянь-Шань); 5, 6 – Нарын, Кара-Дарья (Центральный Тянь-Шань); 7, 8 – Варзоб, Кызылсуу-Вахш (Памиро-Алай); 9 – Гунт-Пяндж (Восточный Памир).

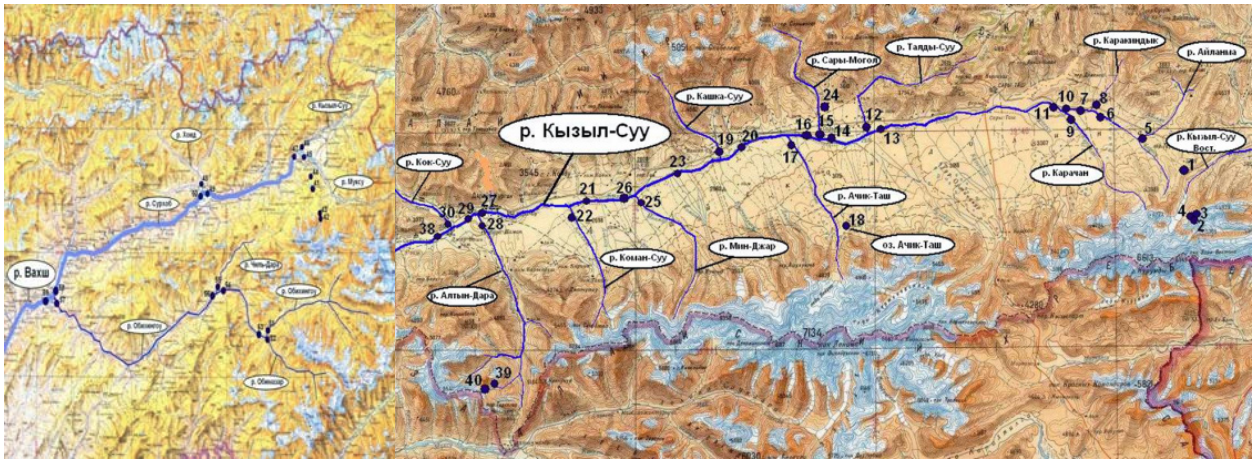


Рис. 2. Места уран-изотопного опробования вод бассейнов рек Муксу-Сурхоб-Обихинггоу-Вахш (а) т Кызылсуу (б)

Таблица 1. Изотопы урана в талых водах ледников Тянь-Шаня и Памира

Шифр проб - год отбора	Место отбора	Координаты	Высота м	$^{234}U/^{238}U$	C_U, 10^{-6} г/л
КСУ2-13	Снег с ледника Кызылсу	N 39°32’13,10 E 73°40’43,55	4173	0,8 ± 0,2	0,32 ± 0,06
КСУ4-13	Лед ледника Кызылсу	N 39°32’22,40 E 73°40’31,76	4095	1,3 ± 0,3	0,22 ± 0,06
КСУ24-13	Снег в долине р. Сары-Могол	N 39°41’19,08 E 72°53’22,72	3024	1,2 ± 0,2	0,38 ± 0,05
KZS40-13	Снег с ледника левого притока р. Алтын-Дара	N 39°15’58,20 E 73°29’10,93	4431	1,0 ± 0,3	0,11 ± 0,04
KZS40-13	Снег с ледника Мургазы	N 39°15’58,24 E 73°29’10,93	4431	1,0 ± 0,3	0,11 ± 0,04
П18-16	Ледник Ленина	N 39°07’07,67 E 71°29’43,60	3116	1,0 ± 0,3	0,12 ± 0,02
1А-14	Снег с ледника Адыгене	N 42°50’72,63 E 74°43’73,50	3658	1,00 ± 0,04	0,11 ± 0,01
Кар1-15	Ледник Карабаткак	N 42°09’14,82 E 78°16’09,95	3500	1,00 ± 0,04	0,17 ± 0,04
Кар2-15	Ледник Карабаткак	N 42°09’22,50 E 78°16’10,55	3385	1,05 ± 0,05	0,32 ± 0,05
KZS19-16	Лед с поверхности ледника Карабаткак	N 42°09’14,8 E 78°16’08,95	3387	1,29 ± 0,17	0,14 ± 0,04
KZS20-16	Приледниковое озеро Карабаткак	N 42°09’32,50 E 78°16’13,55	3383	0,84 ± 0,07	0,40 ± 0,06
2К-18	Снег с ледника Карабаткак	N 42°09’14,82 E 78°16’08,95	3500	1,07 ± 0,07	0,22 ± 0,05

посвящена обобщению результатов по оценке генетических составляющих стока в зонах формирования водных ресурсов основных речных бассейнов Тянь-Шаня и Памира по изотопному составу урана в поверхностных и подземных водах.

Объекты и методы

Объектами исследования являлись воды зон формирования стока ряда рек Тянь-Шаня и Памиро-Алая (Рис. 1). Там в летне-осеннее время 2015–2018 гг. проводилось опробование на общее содержание урана и соотношение $^{234}U/^{238}U$ основных источников, ответственных за водные ресурсы исследованных речных бассейнов: талых вод ледников и приледниковых зон, поверхностных водотоков и выклинивающихся вод родников (Рис. 2). Анализ изотопного состава урана определялся альфа-спектрометрически после осаждения его на активированном угле или гидрооксиде железа и последующей радиохимической очистки [1, 3, 14], либо масс-спектрометрически на лазерных масс-спектрометрах [17, 18]. Методические особенности измерений и их результаты подробно представлены в работах [3–16].

Обсуждение результатов

Полученные ранее результаты многолетнего изучения изотопного состава урана в талых водах приледниковых зон Тянь-Шаня и Памира свидетельствуют о том, что атмосферные осадки и льды содержат ультранизкие, но измеримые (0,1–0,3 ppb) концентрации урана с равновесным в единицах активности отношением $^{234}U/^{238}U$ (таблица 1). По-видимому, это уран, растворенный из эоловой пыли загрязненной атмосферы.

В приледниковых водах, формирующихся в контакте с водовмещающими породами, возрастает содержание урана и увеличивается отклонение от равновесия отношения $^{234}U/^{238}U$. Это особенно характерно для вод морено-ледникового комплекса Адыгене и Тезтор на Северном Тянь-Шане (таблица 2).

Таблица 2. Изотопы урана в водах приледниковых зон Тянь-Шаня и Памира

Шифр проб - год отбора	Место отбора	Координаты	Высота м	$^{234}U/^{238}U$	C_U, 10^{-6} г/л
1Т-91	Оз. Тезтор-1	42,538194 74,428330	3603	0,93 ± 0,01	23 ± 1
2Т-91	Оз. Тезтор-2	42,536931 42,719150	3604	1,00 ± 0,01	1,14 ± 0,03
3А-14	Приледниковое озеро Адыгене	42,509954 74,441155	3633	1,00 ± 0,04	0,33 ± 0,04
4А-14	Озеро внутриморенной депрессии	42,512942 74,438181	3590	1,26 ± 0,07	0,7 ± 0,2
10А-14	Термокарстовое оз. Тезтор	42,518724 74,442201	3534	0,97 ± 0,08	4,1 ± 0,7
11А-14	Термокарстовое оз. Тезтор	42,515221 74,446130	3537	1,01 ± 0,04	54,6 ± 0,2
6А-17	Сток из-под ледника Аксай	42,325190 74,305257	2720	1,02 ± 0,02	10,1 ± 0,3
3А-17	оз. Адыгене большое	42,512021 74,437061	3586	1,07 ± 0,09	2,2 ± 0,1
4А-17	оз. Адыгене малое	42,514644 74,441898	3510	1,11 ± 0,06	3,8 ± 0,2
5А-17	Сток из-под морены Адыгене	42,539644 74,454441	2971	1,05 ± 0,06	3,6 ± 0,2
3А-17	Моренно-ледниковое озеро Адыгене большое	42,512021 74,437061	3586	1,07 ± 0,09	2,2 ± 0,1
4А-17	Оз. Адыгене малое	42,514644 74,441898	3510	1,11 ± 0,06	3,8 ± 0,2
KZS43-13	Родник, левый борт долины р. Муксу	9°12’37,17 71°26’56,07	2611	2,2 ± 0,4	0,10 ± 0,03
KZS44-13	Родник, при спуске с плато Тупчак	39°41’33,75 73°26’28,88	3913	2,0 ± 0,3	0,25 ± 0,05

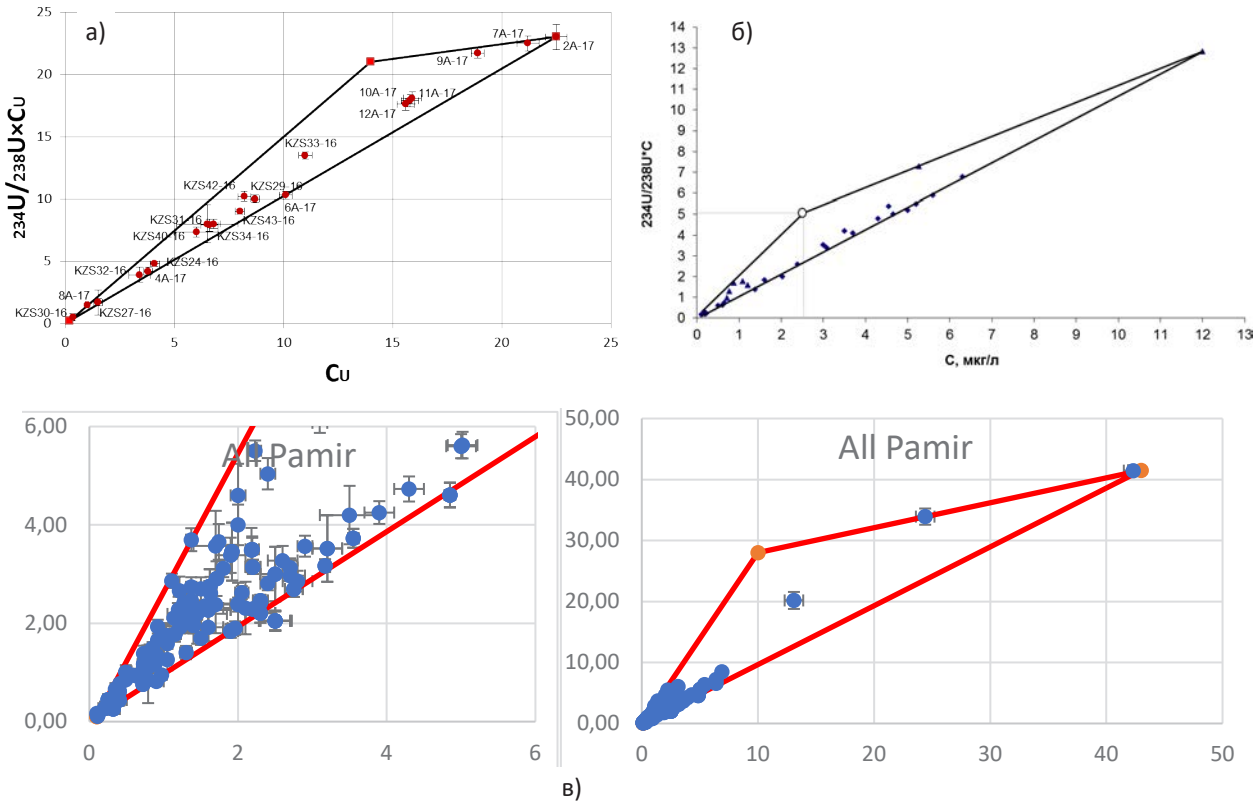


Рис. 3. Уран-изотопные диаграммы речных бассейнов: а, б – Северного Тянь-Шаня (а – Ала-Арча, б – Чон-Кызыл-Суу); в – всего Памира

В приледниковом озере (проба 3А-14) такие же уран-изотопные параметры, как и во льдах самого ледника. Воды термокарстовых озер обогащены в разной степени растворяющимся из водовмещающих пород ураном без заметного обогащения легким изотопом. Воды же озера внутриморенной депрессии 4А-14, скорее всего не ледникового генезиса, а воды глубокой циркуляции из коренных пород – они не обогащены ураном, но имеют заметный избыток ^{234}U. Такие же воды оказались и в приледниковых родниках на Памиро-Алае (табл. 2, пробы KZS43 и 44). Следовательно, уже в приледниковых областях зон формирования стока рек ЦА по уран-изотопным параметрам выявлено три генетических типа вод, питающих горные реки: атмосферные осадки с ультранизким содержанием урана и равновесным соотношением его четных изотопов; воды, претерпевшие контакт с водовмещающими породами, в различной степени обогащенные ураном с небольшим избытком дочернего изотопа; воды глубокой циркуляции из коренных пород с низким содержанием урана и наибольшим избытком ^{234}U. Эти три генетических типа вод на уран-изотопных диаграммах являются вершинами треугольников, внутри которых укладываются все водоисточники данного речного бассейна (рис. 3). Вклад каждого из этих типов вод может быть оценен по соотношению изотопов урана в каждом водном источнике речного бассейна. Эти данные для сотен исследованных водоисточников изложены в работах [6–16].

Благодарности. Автор искренне признательна сотрудникам ИВПиГЭ НАН КР, ИВП,ГЭиЭ АН РТ, Филиала МГУ в Таджикистане и Тянь-Шанского высокогорного научного центра за помощь при отборе проб воды и льда в приледниковых высокогорных зонах, а сотрудникам Каз НУ им.Аль Фараби и Юлиховского исследовательского центра (Германия) – за измерения изотопного состава урана. Работы в 2015–2018 гг. проводились при финансовой поддержке USAID по проекту PEER454.

Литература

1. Буркитбаев М. М. Неравновесный урана как естественный индикатор процессов в водно-экологических системах ЦА / М. М. Буркитбаев, В. М. Уралбеков, Т. V. Тузова. – Алматы: Изд-во Казак университети, 2017. – 160 с.
2. Маматканов Д. Оценка риска прорыва горных озер с использованием уран-изотопного метода / Д. Маматканов, Т. В. Тузова, С. А. Ерохин // Материалы Международной конференции «Проблемы радиоэкологии управления отходами уранового производства в Центральной Азии», 2011. – Бишкек. – С. 88–92.
3. Матвеева И. В. Методические особенности подготовки водных проб горных рек с ультра-

низкими концентрациями урана к альфа-спектрометрическим из-мерениям / И. В. Матвеева, Т. В. Тузова // Вестник Таджикского национального университета, серия естественных наук, 2017. – № 1/2. – С. 151–158.
4. Матвеева И. В. Изотопы урана в водах хвостохранилищ рудника Каджи-Сай / И. В. Матвеева, Ш. Н. Назаркулова, Т. В., Тузова и др. // Вестник КазНУ, серия химическая, 2015. – № 4 (80). – С. 61–67.
5. Тузова Т. В. Оценка распределения стока трансграничных горных рек уран-изотопным методом / Т. В. Тузова // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: Тр 3-ей Всероссийской научной конф. с международным участием. – Барнаул, 2017. – В 4-х томах. – Т. 4. – С. 126–134.
6. Тузова Т. В. Радиоэкологическое состояние вод разного генезиса в районе бывшего уранового рудника Каджисай (Кыргызская Республика) / Т. В. Тузова // Труды Международн. научн. форума «Ядерная наука и технологии». – Алматы, 2017. – С. 287–293.
7. Тузова Т. В. Уран в водах зон формирования стока трансграничных рек Тянь-Шаня и Памира, / Т. В. Тузова, В. В. Загинаев, В. И. Шатравин, Д. Ваткинс, И. В. Матвеева, М. Саидов // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстан, 2018. – № 3. – С. 178–185.
8. Тузова Т. В. // Изотопы урана в водах и льдах верховьев р. Нарын / Т. В. Тузова, Р. А. Сатылканов, В. И. Шатравин, Давид Ваткинс. – Там же, С. 125–130.
9. Тузова Т. Возможности уран-изотопного метода в изучении динамики оледенения, генезиса вод и распределения элементов водного баланса малоизученных горных рек / Т. Тузова, С. Ерохин, В. Шатравин и др. // Международная научно-практическая конф. «Влияние изменения климата на состояние ледников и водные ресурсы», 2014. – Бишкек. – С. 36–38.
10. Тузова Т. В. Оценка прорывоопасности горных озер нестационарного типа уран-изотопным методом / Т. В. Тузова, С. А. Ерохин, В. В. Загинаев // Сб. № 69 научных трудов Института водного хозяйства Грузии, 2014. – Тбилиси. – С. 263–269.
11. Уралбеков Б. М. Изотопы урана в водах бассейна р. Чу / Б. М. Уралбеков, Б. М. Буркитбаев, Д. Маматканов, И. В. Матвеева, Б. С. Сатыбалдиев, Т. В. Тузова // Материалы 4-й Международн. Конф. «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», 2013. – Томск. – С. 535–537.
12. Шатравин В. И. Изотопы урана в водах Алайской долины / В. И. Шатравин, Т. В. Тузова, Б. С. Сатыбалдиев, Б. М. Уралбеков. – Там же . – С. 566–570.
13. Mamatkanov D. Evaluation of Water Balance Components and Ecological Condition of poorly studied Transboundary River Basins by Isotope Methods / D. Mamatkanov, T. V. Tuzova // AASSA Regional Workshop "Sustainable development of Asian countries, water resources and biodiversity under climate change", 2013. – Barnaul. – P. 146–158.
14. Matveyeva I.V. IN-SITU PRE-CONCENTRATING OF URANIUM ISOTOPES ON COAL FOR ALPHASPECTROMETRIC MEASUREMENTS (WITH APPROBATION ON WATER SAMPLES OF MOUNTAIN RIVERS) / I. V. Matveyeva, T. V. Tuzova, N. A. Nursapina, F. S. Meirman, B. M. Uralbekov // 4-th International Conference on Radioecology and Environmerntal Radioactivity // Session 5. Application of novel methods used for monitoring and radioecological studies. – Berlin, 2016. – P. 276–277.
15. Tuzova Tamara URANIUM ISOTOPES IN WATERS AS RADIOECOLOGICAL INDICATOR OF GENESIS OF WATERS AND RELATIVE DISTRIBUTION OF WATER RESOURCES OF MOUNTAIN RIVERS IN CENTRAL ASIA / Tuzova Tamara, Matveyeva Ilona, Uralbekov Bolat. –Там же. – P. 237–238.
16. Uralbekov B. Spatial and temporal variability of $^{234}U/^{238}U$ activity ratios in the Shu River, Central Asia / B. Uralbekov, M. Burkitbaev, B. Satybaldiev, I. Matveeva, T. Tuzova, D. Snow // Environmental Earth Sciences, 2014. – № 4. – P. 148–160.
17. Uranium-series disequilibrium, application to earth, marine and environmenral sciences // Editerby Ivanovich M. and Harmon R.S.- Oxford: Clarendon Press, 1992. – 910 p.
18. Zoriy P. B. Heuel-Fabianek. Assement ofuranium concentration in water samples collected in selected regions of the Kyrgyz Republic / P. Zoriy, M. Schläger, T. Tuzova, M. Zoriy, J. Pillaht, B. Heuel-Fabianek // 8-я Международная конференция «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы разви¬тия научно-технического потенциала». – Курчатов, 2018. – С. 327–328.

ИССЛЕДОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОЗДУХЕ СТЕПНОЙ ЗОНЫ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Д. В. Турченко, М. А. Умаров, А. А. Круглыхин

Филиал Институт радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК
Курчатов, Казахстан, turchenko@nnc.kz

RESEARCH OF THE CONTENT OF NATURAL AND ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN THE AIR OF THE STEPPE ZONE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

D. V. Turchenko, M. A. Umarov, A. A. Kruglykhin

Branch Institute of Radiation Safety and Ecology NNC RK
Kurchatov, Kazakhstan, turchenko@nnc.kz

The article presents results on assessing the levels of radioactive contamination of the air with natural and artificial radionuclides (NRN and ARN) on the territory of the Republic of Kazakhstan for a typical landscape unit - the steppe zone. It was found that the content of ^{40}K in the air varies from 6.5 • 10^{-6} to 9.5 • 10^{-5} Bq/m^3, ^{226}Ra - from 2.5 • 10^{-6} to 5.0 • 10^{-5} Bq/m^3, ^{7}Be – from 9.0 • 10^{-4} to 4.5 • 10^{-3} Bq/m^3, ^{210}Pb – from 1.0 • 10^{-4} to 8.5 • 10^{-4} Bq/m^3, $^{239+240}$Pu – from < 1.0 • 10^{-7} to 7.3 • 10^{-7} Bq/m^3. The data obtained on the background concentrations of NRN and ARN in the air are corresponded to ranges of values of international monitoring observations and in the future can be used as baseline indicators for assessing changes in the quality of the air environment.

Введение

При оценке влияния на окружающую среду того или иного ядерного события, произошедшего в мире, необходимо иметь представление о текущих уровнях содержания естественных и искусственных радионуклидов (ЕРН и ИРН) в объектах окружающей среды, так называемых фоновых уровнях.

В результате природных климатических процессов глобальные радиоактивные выпадения, находящиеся на поверхности почвенного покрова, непрерывно подвергаются процессам эрозии и равномерно перераспределяются в окружающей среде [1]. ЕРН находятся в любой из природных сред (почва, растения, вода, воздух). Радионуклиды ^{40}K, ^{234}Th, ^{226}Ra находятся в почве, растениях и воде. Радионуклид ^{210}Pb поступает из почвы в результате распада радона, ^{7}Be является космогенным и перераспределяется из верхних слоев атмосферы. ИРН в окружающую среду поступили в результате выпадений глобальных радиоактивных осадков при проведении ядерных испытаний, возникновении радиационных аварий на объектах ЯТЦ, других радиационных событий и инцидентов в мире. Согласно данным, предоставленнымнаучным комитетом Организации Объединенных Наций (ООН) по воздействию атомной радиации, большинство выпадений произошло в северном полушарии (около 77 %), оставшаяся часть (23 %) – в южном полушарии [2]. Следует отметить, что максимальное количество радиоактивных выпадений в северном полушарии приходится на широту от 40° до 50°. В данном диапазоне широт расположена территория Республики Казахстан.

Материалы и методы

Для определения фоновых уровней ЕРН и ИРН в атмосферном воздухе были заложены исследовательские профили на 65-м, 70-м, 75-м, 80-м и 82-ммеридианах восточной долготы (в. д) в пределах степной зоны на территории Республики Казахстан. На каждом профиле заложено по 5 исследовательских участков, на которых проводился отбор проб воздушных аэрозолей.

Отбор каждой пробы воздушных аэрозолей проводился на протяжении 14–16 часовстационарным пробоотборником воздуха «Бриз», производительностью 1500 м^3/ч. Средний объем прокачанного воздуха на 1 пробу воздуха составлял не менее 25 000 м^3.

Каждая отобранная проба воздуха подготавливалась в лабораторных условиях методом озоления и анализировалась гамма-спектрометрическим методом на содержание искусственных (^{241}Am, ^{137}Cs) и естественных (^{40}K, ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{7}Be, ^{210}Pb) радионуклидов. После проведения гамма-спектрометрического анализа пробы воздушных аэрозолей анализировались радиохимическим методом на содержание радионуклидов ^{90}Sr и $^{239+240}$Pu.

Результаты и их обсуждение

Согласно полученным экспериментальным данным, независимо от области Казахстана объемная активность ЕРН в воздушной среде находится на уровне природного фона. Диапазон объемной активности естественных радионуклидов на территории Казахстана составил: для ^{40}K – от 6,5 • 10^{-6} до 9,5 • 10^{-5} Бк/м^3, для ^{226}Ra – от 2,5 • 10^{-6} до 5,0 • 10^{-5}

Бк/м^3, для ^{232}Th – < 6,5 • 10^{-6} Бк/м^3, для ^{7}Be – от 9,0 • 10^{-4} до 4,5 • 10^{-3} Бк/м^3, для ^{210}Pb – от 1,0 • 10^{-4} до 8,5 • 10^{-4} Бк/м^3.

Содержание искусственных радионуклидов ^{241}Am, ^{137}Cs и ^{90}Sr в воздухе территории Казахстана находится на уровне предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения. Содержание радионуклида $^{239+240}$Pu в воздухе варьирует от < 1,0 • 10^{-7} до 7,3 • 10^{-7} Бк/м^3, что 3 порядка ниже допустимой объемной активности для категории население ($ДОА_{НАС}$), установленной гигиеническими нормативами [3].

Результаты показали, что расчетные и экспериментальные данные объемной активности радионуклидов в атмосферном воздухе на исследуемой территории, в целом, хорошо согласуются. Лишь для ^{210}Pb объемная активность радионуклида, полученная расчетным методом, оказалась значительно ниже, чем при экспериментальном исследовании.

Заключение

В результате проведенных исследований установлен диапазон фоновых уровней ЕРН и ИРН в воздушной среде степной зоны Павлодарской, Акмолинской и Костанайской области Республики Казахстан. Определено, что данные, полученные в ходе экспериментальных работ и теоретических расчетов, хорошо согласуются между собой. Данные, полученные по фоновым концентрациям ЕРН в воздухе, входят в диапазоны международных мониторинговых наблюдений [4, 5, 6, 7, 8] и в дальнейшем могут быть использованы в качестве базовых показателей для оценки изменения качества воздушной среды.

Литература

1. Alewell C. $^{239+240}$Pu from contaminant to soil erosion tracer: Where do we stand? / C. Alewella, A. Pitois, K. Meusburger, M. Ketterer, L. Mabit // Earth-Science Reviews, 2017. – Vol. 172. – P. 107–123.
2. Evrard O. A global review of sediment source fingerprinting research incorporating fallout radiocesium (^{137}Cs) / O. Evrard, P. Chaboche, R. Ramona, A. Foucher, P. Laceby // Geomorphology, 2020. – Vol. 362. – P. 107103.
3. Гигиенические нормативы «Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности», № 155 от 27.02.2015 года.
4. Hötzl H. Winkler R., Activity concentrations of ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{210}Pb, ^{40}K and ^{7}Be and their temporal variations in surface air // Journal of Environmental Radioactivity, 1987. – Vol. 5. – P. 445–458.
5. Corcho Alvarado J. A., Steinmann P., Estier S., Bochud F., Haldimann M., Froidevaux P., Anthropogenic radionuclides in atmospheric air over Switzerland during the last few decades // Nature Communications, 2014. – 5.3030. https://doi.org/10.1038/ncomms4030.
6. http://www.chelpogoda.ru/pages/310.php.
7. Todorovic D., Popovic D., Djuric G., Concentration measurements of ^{7}Be and ^{137}Cs in ground level air in the Belgrade City area // Environment International, 1999. – Vol. 25. – P. 59–66.
8. Sik Choia M., Lee D., Choi J., Cha H., Yi H. $^{239+240}$Pu concentration and isotope ratio (^{240}Pu/^{239}Pu) in aerosols during high dust (Yellow Sand) period, Korea // Science of The Total Environment, 2006. – Vol. 370. – P. 262–270.

О НЕКОТОРЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРАХ, ВЛИЯЮЩИХ НА ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОРИЯ В СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ БАССЕЙНАХ ЮРСКОГО ВОЗРАСТА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ

В. В. Турышев, П. О. Бородина

Тюменский индустриальный университет
Тюмень, Россия, vvturyshev@yandex.ru

ON SOME GEOLOGICAL FACTORS AFFECTING THE DISTRIBUTION OF THORIUM IN THE SEDIMENTATION BASINS OF THE JURASSIC AGE OF THE WEST SIBERIAN PLATE

V. V. Turyshev, P. O. Borodina

Industrial University of Tyumen
Russia, vvturyshev@yandex.ru

The aim of the study was to analyze the regularities of the distribution of thorium in the area of the Jurassic sedimentation basins of the West Siberian plate, depending on the influence of various geological and geochemical factors. It is established that the thorium content is due to the dispersion of rocks, the type of climate, the position of the sources of demolition and individual lithologic-facies zones, the clastogenic component of bituminous shales. The results obtained can be used to substantiate the level of Th accumulation in various lithological types of rocks, to conduct lithological-facies analysis, and to perform paleogeographic reconstructions of sedimentary environments.

Введение

Торий и уран накапливаются в ходе дифференциации магматического вещества в темноцветных минералах (пироксене, биотите, роговой обманке и некоторых других) и вместе с ними и глинистыми минералами, образованными в коре выветривания, транспортируются водными потоками в конечный водоем стока. Вторая форма накопления тория – в составе устойчивых акцессорных минералов, преимущественно в монаците, цирконе и ортите [4, 6, 11, 12].

Специфические геохимические свойства трех радиоактивных элементов – тория, урана и калия, проявляемые в процессах седиментогенеза, послужили основанием для использования их в геологических науках – радиогеологии и геохимии. Особенности присутствия тория в древних бассейнах седиментации на территории Советского Союза позволили выявить его возможности при изучении некоторых процессов накопления осадочного материала. Было установлено [1, 6], что данные по распределению тория позволяют определить положение областей сноса, наметить пути поступления терригенного материала, выделить мелководные прибрежные зоны.

В опубликованных позже работах [3–5, 7, 9, 13–15, 17] были изложены общие закономерности распределения тория на площади бассейнов седиментации, по стратиграфическому разрезу и литолого-фациальному профилю юрского и нижнемелового времени Западно-Сибирской плиты. Следующий этап исследований предполагает изучение геологических факторов, контролирующих установленные закономерности, с целью подтверждения индикаторной роли тория в процессах осадкообразования, проведения палеогеографических реконструкций обстановок осадконакопления, фациального анализа, обоснования уровня накопления Th в различных петрографических типах горных пород. Предлагаемая статья посвящена изучению юрских осадочных отложений Западной Сибири.

Краткий геологический очерк изучаемых объектов

С геологической точки зрения Западно-Сибирская низменность представляет собой эпигерцинскую платформу, палеозойский фундамент которой перекрыт толщей чередующихся песчано-алевритовых и глинистых осадков мезозойско-кайнозойского возраста. Мощность осадочного чехла достигает 3–3,5 км в центральной части и 10–14 км – в северной. Горным обрамлением региона являются складчатые системы восточного склона Урала, Северного Казахстана, Алтае-Саянской области, Кузнецкого Алатау, Енисейского кряжа, Колывань-Томской дуги, Сибирской платформы, полуострова Таймыр и Карско-Баренцевой платформы [16].

В строении юрской системы Западно-Сибирского региона принимают участие отложения следующих ярусов (снизу вверх): геттанга (J_1h), синемюра (J_1s), плинсбаха (J_1p), тоара (J_1t), аалена (J_2a), байоса (J_2bj), бата (J_2bt), келловея (J_2cl), оксфорда (J_3ox), кимериджа (J_3km), волжского яруса (J_3v) [8, 10].

Материал и методы

Определения содержаний тория в образцах песчаных, алевролитовых, аргиллитовых и смешанных горных пород, отобранных в поисково-разведочных скважинах, выполнялись на однокристальной гамма-спектрометрической установке института ЗапСибНИИГГ (г. Тюмень) с детектором NaJ (Tl) размерами 150 × 100 мм и колодцем 65 × 60 мм. Установка включала фотоумножитель типа ФЭУ-94, аппаратуру регистрации и защитный свинцовый блок. Образцы, не требовавшие специальной подготовки, взвешивались на аналитических весах и в виде обломков породы массой ≈ 100 г помещались в герметичный стакан и далее – в колодец кристалла. Время измерения одного образца составляло примерно 1 час. Порог чувствительности определения тория – 2,55 (г/т). Средняя относительная погрешность определения тория составила 17,5 (%).

Было проанализировано ≈ 6300 образцов горных пород месторождений углеводородов Западной Сибири, составивших две отдельные литолого-петрографические группы: 1) песчано-алевролитовых разностей и 2) глин (аргиллитов).

Полученные средние содержания тория по месторождениям послужили материалом для построения контурных карт (схем равных содержаний тория) в программном приложении «Surfer». С целью повышения достоверности и улучшения наглядности данные в большинстве случаев были дополнительно осреднены по основным нефтегазоносным районам, как правило, приуроченным к положительным тектоническим структурам I–II порядка. Средние значения содержаний тория показаны на соответствующих схемах.

Изучение статистического закона распределения тория в юрских породах было проведено в программном приложении «Statistica». Установлено, что торий распределяется нормально более чем в половине случаев, треть значений имеет логнормальное распределение и 9 % – иной тип распределения. Поскольку большинство значений тория отвечает нор-

Таблица 1. Результаты корреляционно-регрессионного анализа взаимосвязей естественных радиоактивных элементов с содержанием пелитовой фракции d < 0,01 мм [15]

Н/газоносный район	Отложения	Вид зависимости	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Среднеквадратическое отклонение	Количество образцов
Нижневартовский	Тюменская и васюганская свита	$С_{гл} – С_{к}$	–	0,45	–	136
		$С_{гл} – С_{u}$	$С_{гл} = – 0,98 + 9,61\ С_{u}$	0,75	± 5,20	128
		$С_{гл} – С_{th}$	$С_{гл} = – 3,98 + 3,49\ С_{th}$	0,76	± 5,14	134
		$С_{гл} – Q_{γ}$	$С_{гл} = – 14,24 + 13,08\ Q_{γ}$	0,84	± 4,61	134
		$С_{гл} – Q_{u+th}$	$С_{гл} = – 3,62 + 15,24\ Q_{u+th}$	0,86	± 4,24	134
Краснолениинский	Тюменская свита	$С_{к} – С_{гл}$	–	0,73	–	30
		$С_{u} – С_{гл}$	–	0,62	–	32
		$С_{th} – С_{гл}$	$С_{th} = 0,315\ С_{гл} – 0,252$	0,80	± 1,20	32
		$Q_{γ} – С_{гл}$	$Q_{γ} = 4,536\ lg\ С_{гл} – 3,348$	0,79	± 0,38	32
		$Q_{k+th} – С_{гл}$	$Q_{kth} = 0,971\ С_{гл} – 8,109$	0,83	± 3,36	32
Вэнгапуровский	Тюменская и васюганская свита	$С_{гл} – С_{к}$	$С_{гл} = – 4,76 + 10,06\ С_{к}$	0,80	± 3,55	47
		$С_{гл} – С_{u}$	–	0,59	–	47
		$С_{гл} – С_{th}$	–	0,57	–	48
		$С_{гл} – Q_{γ}$	$С_{гл} = – 0,01 + 5,50\ Q_{γ}$	0,84	± 3,05	44
Сургутский	Тюменская свита	$К_{гл} – С_{к}$	–	0,25	–	60
		$К_{гл} – С_{u}$	–	0,39	–	60
		$К_{гл} – С_{th}$	–	0,44	–	60
		$К_{гл} – Q_{γ}$	–	0,52	–	60
		$К_{гл} – Q_{u+th}$	–	0,50	–	60

$С_{гл}$ – весовая глинистость (пелитовая фракция < 0,01 мм); $К_{гл}$ – объемная глинистость; $С_{к}$, $С_{u}$, $С_{th}$ – содержания соответственно калия (масс. %), урана (г/т), тория (г/т); $Q_{γ}$ – удельная радиоактивность, пг-экв Ra/г; Q_{u+th}, Q_{k+th} – удельная суммарная радиоактивность соответственно урана и тория, калия и тория.

мальному закону распределения, средние содержания Th в продуктивных пластах рассчитывались как среднеарифметическое.

Схемы, выполненные для четырех бассейнов седиментации юрского возраста (тоар, байос-бат, келловей-оксфорд, волжский век), в дальнейшем накладывались на геологическую основу, в качестве которой принят «Атлас литолого-палеогеографических карт юрского и мелового периодов Западно-Сибирской равнины в масштабе 1 : 5000000» 1976 г. под редакцией И. И. Нестерова [2].

Кроме схем распределения массовых содержаний тория, использовались также схемы распределения на площади содержаний отдельных размерных фракций по результатам гранулометрического анализа образцов, составленные авторами на материалах Западно-Сибирского научно-исследовательского института геологии и геофизики.

Результаты и их обсуждение

Тоар. Распределение тория в песчано-алевритовых разностях по центральной части плиты мало дифференцировано. Повышенные до 8 % значения содержания Th в Надымском и Уренгойском районах могут быть связаны с наличием северных питающих провинций (Карско-Баренцева платформа, Таймыр, Сибирская платформа); повышенные содержания в

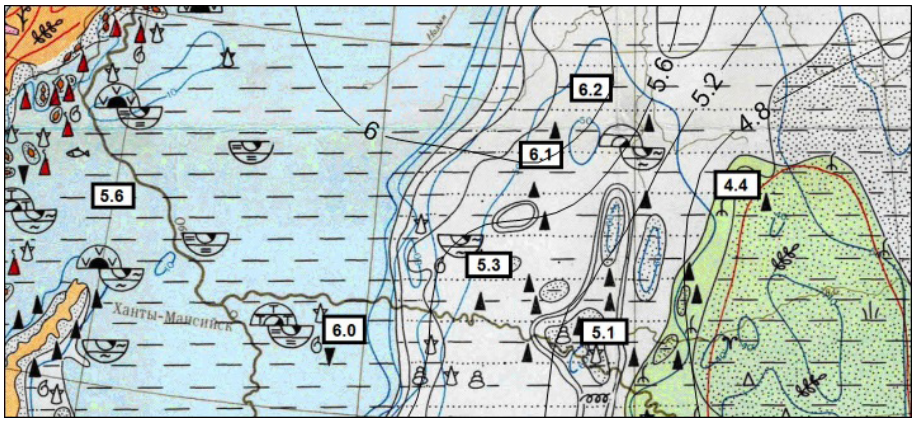


Рис. 1. Распределение тория в песчано-алевролитовых породах келловей – оксфордского века. Масштаб 1 : 5000000

1 – среднее содержание тория в нефтегазоносном районе (на структуре I–II порядка), г/т; 2 – линии равных содержаний тория; 3 – изопахиты, м; 4 – границы площадей с разной палеогеографической обстановкой и разными литофациями; 5 – глинистые осадки; 6 – глинисто-песчанистые осадки (60–41 %); 7 – песчано-глинистые осадки (40–21 %); 8 – песчанистые осадки (80–61 %); 9 – песчаные осадки (свыше 80 %); 10 – море, относительно глубокая часть шельфа; 11 – море, мелкая часть шельфа и прибрежная зона; 12 – равнина прибрежная, периодически заливавшаяся морем; 13 – равнина возвышенная; 14 – плато, нагорье; 15 – нефтяные залежи.

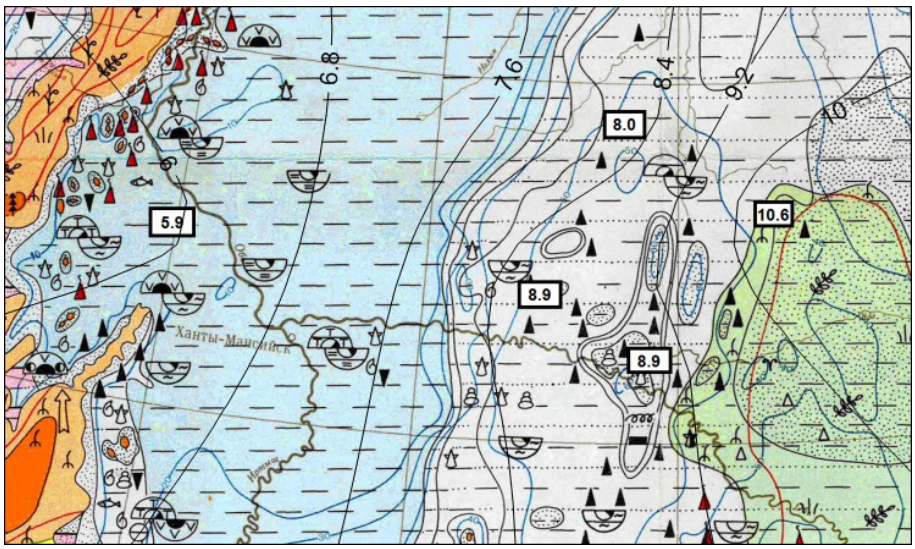


Рис. 2. Распределение тория в глинистых породах келловей–оксфордского века. Масштаб 1 : 5000000

1 – среднее содержание тория в нефтегазоносном районе (на структуре I–II порядка), г/т; 2 – линии равных содержаний тория. Остальные условные обозначения на рис. 1.

Северо-Сургутском районе (8,8 %), возможно, объясняются наличием местных активных источников сноса.

Байос-бат. В среднеюрском веке торий в песчаниках и алевролитах в общих чертах отражает закономерности распределения мелкодисперсной фракции пород размером менее 0,05 мм. Генетическая взаимосвязь тория с глинистой (d < 0,01 мм) составляющей осадков установлена ранее [3, 15] (таблица 1). В аргиллитовых породах распределение тория на площади недифференцировано.

Келловей-оксфорд. В песчаниках (рис. 1) содержания тория возрастают в фациальном ряду «равнина прибрежная – мелководная часть шельфа – относительно глубоководная часть шельфа» (≈ 4–6 г/т), в аргиллитах (рис. 2) наблюдается противоположный характер распределения Th (≈ 10–6 г/т). Выявленные закономерности хорошо объясняются в свете работы А. Б. Ронова и А. А. Мигдисова, изучающей поведение тория в осадочных отложениях Русской платформы.

Расположение тория по фациальному профилю бассейна определяется как петрографическим составом пород водосборной площади, так и климатическими и тектоническими особенностями осадочного цикла. Гумидный климат и спокойная тектоническая обстановка способствуют дифференциации тория и других элементов-гидролизатов по фациальным зонам. В этих условиях содержания тория в сторону глубоководной зоны обычно понижаются в глинах (разубоживание глин) и возрастают в песчано-алевролитовых породах. Последняя закономерность в значительной мере обусловлена процессом субаэрального выветривания, развитым на континенте и ослабевающим в направлении пелагической области и перераспределяющим торий из континентальных песчаников в глинистые породы [11]. Данные рисунков 1 и 2 подтверждают характер рассеяния тория по фациям в зависимости от петрографического состава пород и климатических условий; торий в отложениях оксфордского времени позиционируется как индикатор фациальных областей и гумидного климата осадконакопления.

Волжский век. В битуминозных сланцах волжского века содержания тория уменьшаются от краев плиты (≈ 9 г/т) к центру (≈ 5,4 г/т), отражая разбавление терригенного компонента пород керогеном [17].

Заключение

Распределение тория на территории Западно-Сибирской низменности в юрском времени обусловлено степенью дисперсности осадков (отложения байоса-бата), а также фациальными и климатическими условиями существовавшей обстановки осадконакопления (келловей-оксфорд). В зависимости от петрографического состава отложений – песчаные или глинистые – содержания тория могут повышаться или понижаться в сторону глубоководных фаций, отражая те или иные протекавшие геологические процессы.

В черных сланцах баженовской свиты торий надежно индицирует увеличение органического углерода к центру плиты и, соответственно, смену относительно глубоководных фаций глубоководными понижением содержаний.

Литература

1. Алексеев Ф. А. Использование ядерных методов в нефтегазовой геологии / Ф. А. Алексеев, Р. П. Готтих, В. С. Лебедев. – М.: Недра, 1973. – 383 с.
2. Атлас литолого-палеогеографических карт юрского и мелового периодов Западно-Сибирской равнины. Масштаб 1 : 5000000, 1976.
3. Волков Е. Н. Естественная радиоактивность отложений тюменской свиты Красноленинского и Сургутского сводов / Е. Н. Волков, В. В. Турышев, В. В. Хабаров // Научно-технический прогресс при поисках и освоении нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири, 1984. – Вып. 63. – С. 6–9.
4. Гавшин В. М. Радиогеохимическая специфика крупных осадочных бассейнов Западной и Средней Сибири / В. М. Гавшин // Геология и радиогеохимия Средней Сибири. – Новосибирск: Наука, 1985. – С. 173–192.
5. Гавшин В. М. Распределение урана, тория и калия в морских терригенных отложениях мезозоя Западно-Сибирской плиты / В. М. Гавшин, В. А. Бобров, Р. Г. Демина, Л. М. Дорогиницкая // Геохимия рудных элементов в процессах выветривания, осадконакопления и катагенеза. – Новосибирск: Наука, 1979. – С. 128–160.
6. Готтих Р. П. Радиоактивные элементы в нефтегазовой геологии / Р. П. Готтих. – М.: Недра, 1980. – 251 с.
7. Зуев Л. П. Гамма-спектрометрическая характеристика пород продуктивных отложений Среднего Приобья / Л. П. Зуев, В. С. Кудрявцев, В. Г. Мамышев, Т. Ф. Никанорова // Региональная, разведочная и промысловая геофизика (экспресс-информация). – М.: ВИЭМС, 1979. – С. 1–16.
8. Конторович А. Э. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде / А. Э. Конторович, В. А. Конторович, С. В. Рыжкова и др. // Геология и геофизика, 2013. – Т. 54. – № 8. – С. 972–1012.
9. Плуман И. И. Распределение урана, тория и калия в отложениях Западно-Сибирской плиты / И. И. Плуман // Геохимия, 1975. – № 5. – С. 756–766.

10. Решение 6-го Межведомственного стратиграфического совещания по рассмотрению и принятию уточненных стратиграфических схем мезозойских отложений Западной Сибири / Объяснительная записка. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2004. – 114 с. (с приложениями).
11. Ронов А. Б. Основные черты геохимии элементов-гидролизатов в процессах выветривания и осадконакопления / А. Б. Ронов, А. А. Мигдисов // Геохимия,1965. – № 2. – С. 131–158.
12. Смыслов А. А. Уран и торий в земной коре / А. А. Смыслов. – Л.: Недра, 1974. – 231 с.
13. Турышев В. В. Естественные радиоактивные элементы как индикаторы условий образования осадочных отложений Западно-Сибирской плиты / В. В. Турышев // Геохимия, 2018. – № 9. – С. 883–894.
14. Турышев В. В. Особенности пространственно-временного и литолого-фациального распределения естественных радиоактивных элементов в юрских и нижнемеловых отложениях Западно-Сибирской плиты / В. В. Турышев // Геохимия, 2017. – № 1. – С. 26–40.
15. Турышев В. В. Проблемы определения глинистости нефтегазонасыщенных горных пород методом естественной радиоактивности (на примере месторождений Западной Сибири) / В. В. Турышев // Каротажник, 2013. – № 9. – С. 23–49.
16. Ушатинский И. Н. Минералогические и геохимические показатели нефтегазоносности мезозойских отложений Западно-Сибирской плиты / И. Н. Ушатинский, О. Г. Зарипов. – Свердловск, 1978. – 207 с.
17. Хабаров В. В. Уран, калий и торий в битуминозных породах баженовской свиты Западной Сибири / В. В. Хабаров, О. М. Нелепченко, Е. Н. Волков, О. В. Барташевич // Советская геология, 1980. – № 10. – С. 91–105.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ СВОБОДНЫХ РАДИКАЛОВ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАБОТКИ ИОНИЗИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ СУШЕНОГО УКРОПА

О. В. Тхорик, И. М. Меджидов, В. А. Харламов, И. В. Полякова,
Т. В. Чиж, А. Ю. Шестериков, В. И. Шишко

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
Обнинск, Россия, oxana.tkhorik@gmail.com

APPLICATION OF THE METHOD OF ELECTRONIC PARAMAGNETIC RESONANCE FOR THE QUALITATIVE ASSESSMENT OF FREE RADICALS FORMED FROM TREATMENT WITH IONIZING RADIATION OF DRIED DILL

O. V. Tkhorik, I. M. Medzhidov, V. A. Kharlamov, I. V. Polyakova,
T. V. Chizh, A. Yu. Shesterikov, V. I. Shishko

Russian Institute Radiology and Agroecology
Obninsk, Russia, oxana.tkhorik@gmail.com

The paper presents the possibility of the method of electron paramagnetic resonance (EPR) for the identification of radiation-processed food products using the example of dried dill. A proposal has been put forward to create a unified database that includes data on the main parameters of the EPR spectra of various food products. A relationship was found between the radiation dose and the amplitude of the EPR spectra. We also compared the EPR spectra of dried dill irradiated with a dose of 9 kGy, obtained a day, a month, and a year after irradiation.

Введение

Экологическая обстановка и радиационная безопасность окружающей среды являются важными аспектами жизни человека. Одной из главных составляющих благоприятной экологической обстановки является контроль за безопасностью пищевой продукции. В настоящее время крайне популярной является радиационная обработка пищевой и сельскохозяйственной продукции с целью стерилизации [1–3], дезинсекции [4–6], увеличению сроков годности продукции [7–9]. Для радиационного контроля облученной продукции, в настоящее время, существует множество сертифицированных, стандартизованных, одобренных международными организаци-

ями методов [10], однако наиболее перспективным и популярным является метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР метод) [11].

Метод электронного парамагнитного резонанса базируется на избирательном поглощении веществом электромагнитной энергии, что может спровоцировать переходы электронов между энергетическими уровнями. Как известно, такие переходы сопровождаются выделением или поглощением энергии, что в свою очередь фиксируется детектором. На основании этих данных на выходе получается спектр, на основании которого можно провести качественную оценку свободных радикалов в исследуемом образце [12].

Наиболее важным преимуществом данного метода перед остальными, помимо относительной простоты, дешевизны и скорости получения результатов, является возможность идентифицировать облученную продукцию спустя долгое время после облучения (месяцы, а иногда и годы) [13–15]. Существенным недостатком данного метода является высокая зависимость получаемых данных от вида исследуемой продукции. В связи с этим возникает высокая потребность в создании единого каталога данных, включающего в себя основные характеристики ЭПР-спектров для различных продуктов питания, а также, с установленным сроком возможности идентификации облучений пищевой продукции.

Данная работа является небольшой частью глобального проекта по созданию базы данных ЭПР-спектров различной продукции, основной целью которой является исследование ЭПР-спектров сушеного укропа, облученного различными дозами.

Материалы и методы

Образцы сушеного укропа облучали на установке ГУР-120 (ФГБНУ ВНИИРАЭ, Обнинск, Россия) дозами 3, 6 и 9 кГр. ГУР-120 – это стационарная установка, предназначенная для радиационной обработки сельскохозяйственной и пищевой продукции. Установка включает в себя 8 блоков для облучения, вмещающих в себя 56 источников Co-60 с суммарной паспортной активностью гамма-излучения 4,47 • 10^{15} Бк [16].

Анализ и идентификация облученного укропа осуществляется при помощи автоматизированного малогабаритного ЭПР-спектрометра ESR 70-03 XD/2 (Минск, Беларусь). Анализ и получение спектров осуществлялись автоматически, с использованием программной обработки спектров. Исследования проводились в десятикратной повторности. Основными параметрами при анализе ЭПР-спектров являются: амплитуда и полуширина пика. ЭПР-спектроскопия проводилась при частоте модуляции 5000 мЭ, временем снятия 50 сек, мощностью СВЧ генератора 200 мВт, со средним значением магнитного поля 3350 Э в диапазоне 1000 Э.

Поскольку работа проводилась на образцах сушеного укропа, особая пробоподготовка образцов не требовалась. Для получения более «чистых» и достоверных данных, укроп измельчался до состояния пыли и помещался в специальные кварцевые пробирки.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлены полученные ЭПР-спектры образцов сушеного укропа. Для образцов, облученных дозой 3 кГр амплитуда пика составляет 483 отн. ед., а полуширина – 9,83 Гс. Облучение об-

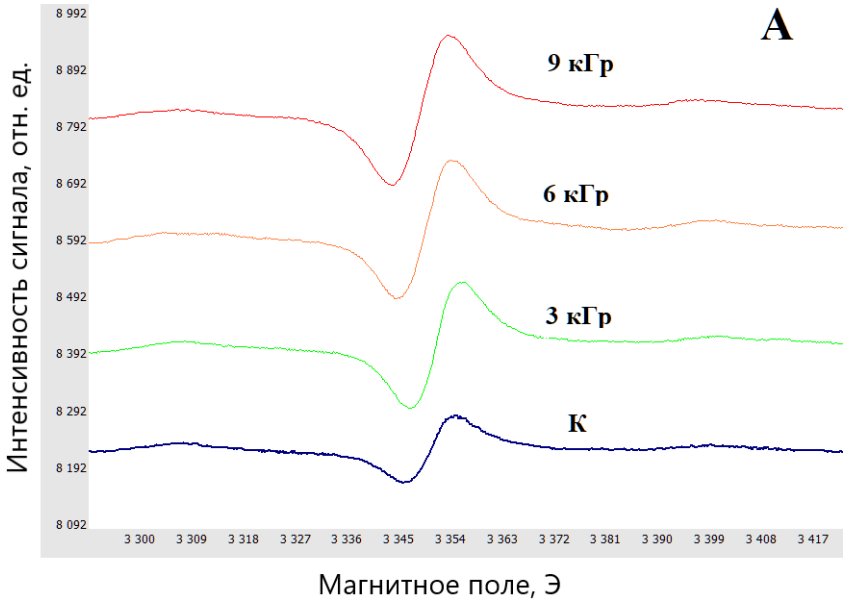


Рис. 1. ЭПР-спектры образцов сушеного укропа, облученных дозами 3, 6 и 9 кГр, в сравнении с ЭПР-спектром контрольного образца

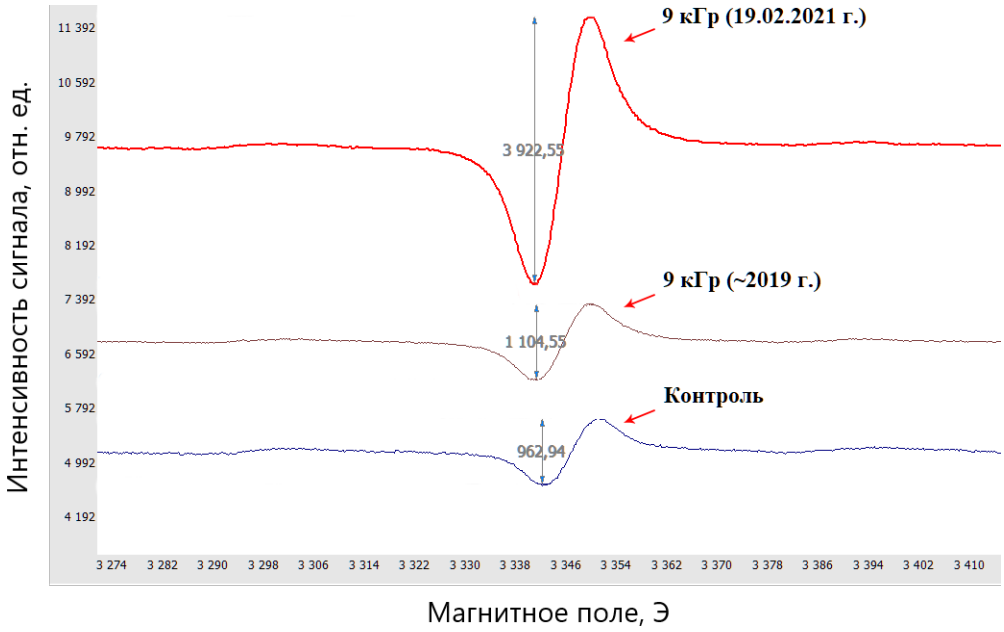


Рис. 2. ЭПР-спектры образцов сушеного укропа, облученных в разное время

разцов сушеного укропа дозой 6 кГр привело к увеличению амплитуды пика ЭПР-сигнала до 560 отн. ед. и его полуширины до 10,1 Гс. Стоит отметить, что в образцах, облученных дозой 9 кГр значительных изменений (относительно образцов, облученных дозой 6 кГр) амплитуды и полуширина пика ЭПР-сигнала не выявлено, и составляет 572 отн. ед. и 10,17 Гс соответственно.

Как видно из представленных рисунков, контрольное значение сушеного укропа имеет пик с амплитудой 384 отн. ед. Это объясняется условиями хранения продукции, которые приводят к образованию свободных радикалов, а также физико-химическими свойствами, индивидуальными для каждого вида продукции.

Для оценки возможности идентифицировать иррадиационной продукции спустя некоторое время, был проведен анализ образцов сушеного укропа, облученного, примерно, 1 год назад дозой 9 кГр. Помимо этого, было проведено сравнение контрольных образцов. На рисунке 3 представлены ЭПР-спектры исследованных образцов. Для наглядности, данные измерения были выполнены с увеличенной амплитудой модуляции, что слегка растягивает полученный спектр по оси ординат.

В результате данного эксперимента, спустя год после облучения амплитуда пика ЭПР-сигнала уменьшилась до 301 отн. ед., т. е. уменьшиласьпримерно в 1,9 раз относительно ЭПР-сигнала, полученного спустя сутки после облучения. Полуширина пика, при этом, увеличилась в 1,6 раз и составила 16,36 Гс. Таким образом, можно заметить, что за год интенсивность сигнала уменьшилась настолько, что стала по амплитуде сопоставима с контролем, что делает невозможным идентификацию облученного сушеного укропа. При сравнении контрольных образцов также было выявлено снижение амплитуды пика ЭПР-сигнала до 226 отн. ед, однако, данное снижение является незначительным.

Заключение

В результате данного исследования можно сделать вывод о том, что с увеличением дозы облучения амплитуда пика увеличивается, при этом существенных изменений в полуширине пика обнаружено не было. Таким образом, можно с уверенностью сказать, что сушеный укроп, облученный дозой 3 кГр и выше можно легко идентифицировать при проверке радиационной безопасности продукта. Однако, если облученный товар (в частности, сушеный укроп) прошел радиационную обработку довольно давно (1 год назад) идентификация его становится невозможной даже при дозе облучения 9 кГр.

Полученные в результате эксперимента данные являются стимулом для проведения более детальных работ по выявлению более точной зависимости между амплитудой пиков и временем, прошедшим с момента облучения.

Данное исследование, также, пополнило базу данных основных параметров ЭПР-спектров для различных видов пищевой и сельскохозяйственной продукции, создание которой, несомненно, поможет упростить и усовершенствовать нынешнюю систему радиационной безопасности пищевой и сельскохозяйственной продукции.

Литература

1. Чиж Т. В. Радиационная обработка свежих овощей и фруктов как перспективный метод стерилизации продукции растениеводства // Техногенные системы и экологический риск: тезисы докладов XII региональной конференции (Посвящается 25-летию кафедры экологии ИАТЭ НИЯУ МИФИ). – Обнинск, 2016. – С. 165–166.
2. Loy N. N. Influence of electronic irradiation on the affection of barley by root rot / N. I. Sanzharova, S. N. Gulina, T. V. Chizh, O. V. Suslova, M. S. Vorobiyov, N. N. Koval, S. Y. Doroshkevich // Journal of Physics: Conference Series, 2019. – Vol. 1393. – P. 012107.
3. Лой Н. Н. Применение ионизирующего излучения для обеспечения фитосанитарной безопасности сельскохозяйственной продукции // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы: сборник докладов международной научно-практической конференции. – Обнинск, 2018. – С. 210–213.
4. Chizh T. V. Low-energy electron beams for protection of grain crops from insect pests and diseases / N. N. Loy, A. N. Pavlov, M. S. Vorobyov, S. Yu. Doroshkevich // Journal of Physics: Conference Series, 2018. – Vol. 1115. – P. 022025.
5. Лой Н. Н. Оценка влияния разных видов ионизирующих излучений на жизнеспособность зернового точильщика / Н. И. Санжарова, С. Н. Гулина, Т. В. Чиж // Ядерно-физические исследования и технологии в сельском хозяйстве: сборник докладов международной научно-практической конференции (к 50-летию со дня образования ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии). – Обнинск, 2020. – С. 343–346.
6. Лой Н. Н. Оценка эффективности применения ионизирующих излучений для дезинсекции зерна / Н. И. Санжарова, С. Н. Гулина // Техногенные системы и экологический риск: тезисы докладов II Международной (XV Региональной) научной конференцию – Обнинск, 2018. – С. 368–369.
7. Лой Н. Н. Перспектива применения радиационных технологий для увеличения сроков хранения овощей / Н. И. Санжарова, Т. В. Чиж, Н. И. Щагина, С. Н. Гулина, М. П. Миронова, В. К. Кузнецов, А. Н. Павлов // Инновационные исследования и разработки для научного обеспечения производства и хранения экологически безопасной сельскохозяйственной и пищевой продукции: сборник материалов II Международной научно-практической конференции. – Краснодар, 2017. – С. 54–58.
8. Лой Н. Н. Влияние гамма-облучения на хранение картофеля / Т. В. Чиж, С. Н. Гулина // Техногенные системы и экологический риск: материалы II Международной (XV Региональной) научной конференции. – Обнинск, 2018. – С. 370–371.
9. Лой Н. Н. Влияние гамма-облучения на хранение и качество свежих овощей и фруктов. / В. К. Кузнецов, Н. И. Санжарова, О. С. Губарева, Т. В. Чиж, С. Н. Гулина // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы: сборник докладов международной научно-практической конференцию – Обнинск, 2018. – С. 214–217.
10. Akram K.Applicability of different analytical methods for the identification of gamma-irradiated fresh mushrooms during storage. / K. Akram, J. J. Ahn, G. R. Kim, J. H. Kwon // Food Science and Biotechnology, 2012. – Vol. 21. – 573–679 p.
11. Тимакова Р. Т. Научно-практические аспекты идентификации и обеспечения сохраняемости пищевой продукции, обработанной ионизирующим излучением: дис. ... д.-р. тех. наук. – Екатеринбург, 2020. – 458 с.
12. Weckhuysen B. M. Electron Spin Resonance Spectroscopy / R. Heidler, R. A. Schoonheydt // Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004. – P. 295–335.
13. Chiaravalle A. E. Electron spin resonance (ESR) detection of irradiated fish containing bone (gilthead sea bream, cod, and swordfish). / M. Mangiacotti, G. Marchesani, G. Vegliante // Veterinary Research Communications, 2010. – Vol. 34. – P. 149–152.
14. Stachowicz W. Application of electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy for control of irradiated food. / G. Strzelczak-Burlinska, J. Michalik // Journal of the Science of Food and Agriculture, 1992. – Vol. 58. – № 3. – P. 407–415.
15. Тхорик О. В. Обзор мирового опыта по оценке радиационной безопасности обработанных ионизирующим излучением сухофруктов, методом ЭПР-спектрометрии / М. Г. Помясова // Ядерно-физические исследования и технологии в сельском хозяйстве: сборник докладов международной научно-практической конференции (к 50-летию со дня образования ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии). – Обнинск, 2020. – С. 369–372.
16. Pavlov A. N. Projectofthesoftwarefor "GUR-120" irradiationfacility / E. N. Denisova, A. S. Snegiryov, G. V. Kozmin, Yu. A. Kurachenko // Environmental, IndustrialandEnergySecurity, 2019: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. – Севастополь, 2019. – P. 81–84.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТА ДОЗ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОКИНЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

А. А. Харченко, А. Н. Шатров, Ф. Ф. Жамалдинов, А. О. Айдарханов

Филиал «Институт Радиационной Безопасности и Экологии» РГП НЯЦ РК
Курчатов, Республика Казахстан, irbe@nnc.kz

DEVELOPEMNT OF SOFTWARE TO CALCUALTE INTERNAL EXPOSURE DOSES USING BIOKINETIC MODELS

A. A. Kharchenko, A. N. Shatrov, F. F. Zhamaldinov, A. O. Aidarkhanov

Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" RSE NNC RK
Kurchatov, The Republic of Kazakhstan, irbe@nnc.kz

This paper provides a review of developed software capabilities (hereinafter Bioscheme software) as well as a calculation procedure for the internal exposure dose the case of the biokinetic model from an ICRP publication No. 78. Compared to the available software applied by the branch IRSE NNC RK, Bioscheme software allows a solution to not only conventional tasks but also simulation and automatic derivation of a function of the intake, accumulation, and decorporation of radionuclides in non-ordinary cases.

Введение

Одним из важных видов деятельности филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан (далее «ИРБЭ» РГП НЯЦ РК) является контроль доз внутреннего облучения персонала и населения.

Контроль доз внутреннего облучения у обследуемых лиц сводится к измерениям на счетчике излучения человека, а также к определению активности радионуклидов в биосубстратах для дальнейшего расчета дозы внутреннего облучения.

В основе подобных расчетов лежат биокинетические модели радионуклидов и модели пищеварительного и респираторного трактов, разработанные Международной Комиссией по Радиологической Защите (далее МКРЗ). На основе табулированных значений скоростей перехода между отдельными камерами биокинетических моделей строится система дифференциальных уравнений, решения которой представляют собой функции изменения активности радионуклида во времени в отдельных органах или тканях, и функции выведения с мочой или калом.

Ввиду сложности калькуляций, современные методы расчета дозы внутреннего облучения с использованием биокинетических моделей предполагают применение специализированного ПО. Программное обеспечение, применяемое на сегодняшний день в филиале «ИРБЭ» РГП НЯЦ РК, такое как MONDAL3 (National Institute of Radiological Sciences, Япония) имеет в своём наборе заранее выведенные функции поступления, накопления и выведения для ограниченного числа радионуклидов, что не позволяет вносить изменения в структуру биокинетической модели. Наряду с изменением структуры биокинетической модели может возникать необходимость использовать и собственные константы для скоростей переходов, отличные от констант опубликованных МКРЗ, что также невозможно сделать с помощью приведенного ПО.

Кроме того, биокинетические модели, разработанные МКРЗ, имеют тенденцию изменяться (актуализироваться) от публикации к публикации [1, 3, 5]. Подобные изменения в биокинетических моделях могут вносить погрешность в результаты, полученные с использованием ПО, расчеты в котором основаны на неактуальной версии модели.

Для решения вышеописанной проблематики необходимо иметь возможность вносить изменения в биокинетическую модель. Это позволило бы как моделировать ситуации вне рамок существующих биокинетических моделей, так и самостоятельно актуализировать данные модели.

Один из вариантов для удовлетворения таких потребностей заключается в приобретении лицензии на специализированное ПО, такое как IMBA Pro Plus (National Radiological Protection Board, Великобритания). Однако, зачастую, специализированное ПО «перегружено» дополнительными функциями и модулями, которые пользователю попросту не нужны. В тоже время, необходимые пользователю модули и методики в дорогостоящем ПО могут вовсе отсутствовать.

Другим, более бюджетным вариантом является составление биокинетической модели «вручную» и решение полученной системы дифференциальных уравнений для выведения функций изменения активности радионуклида во времени в отдельных органах или тканях уникальных для особого случая. Тем

не менее, ввиду большого обилия констант и переменных, данный вариант крайне трудоемок и весьма подвержен человеческому фактору.

Альтернативным вариантом явилась разработка собственного ПО под названием Bioscheme. Преимущество данного варианта заключается не только в том, что отпадает необходимость весьма громоздкой и трудоемкой «ручной» обработки биокинетических моделей, но также и в том, что в собственное ПО можно встроить только тот функционал, который необходим, а в дальнейшем есть возможность добавления новых модулей и методик.

Материалы и методы

До настоящего времени расчет доз внутреннего облучения вне рамок функционала ПО, используемого в филиале «ИРБЭ» РГП НЯЦ РК, велся согласно методике ручного расчёта по данным МКРЗ [2].

На основании значений констант для скоростей перехода между отдельными камерами биокинетической модели строится система дифференциальных уравнений, решения которой являются функциями изменения активности радионуклида во времени в отдельных органах или тканях. Зная, например, активность радионуклида в урине, с помощью выведенной функции можно рассчитать сколько радионуклида поступило в ЖКТ при проглатывании или в лёгкие при вдыхании. Имея таким образом функцию для выведения и данные о поступлении радионуклида, можно рассчитать какое количество радионуклида находилось в организме в течении заданного промежутка времени. Рассчитать дозу внутреннего облучения, имея все вышеуказанные данные, не составит труда.

Для удобства расчетов предполагается, что в момент времени t = 0 произошло пероральное поступление урана с активностью 1 Бк. Коэффициент всасывания равен 0,02. Изотоп урана не уточняется. Начальное условие: $x(0) = 1$, т. е. активность в желудке человека в начальный момент времени равна 1 Бк. Все остальные функции в начальный момент времени равны нулю.

Ниже приведена система дифференциальных уравнений первого порядка, которая описывает изменение активности урана в различных органах и тканях с течением времени. В данном примере все расчеты проводятся относительно взрослого человека.

$$\text{DSolve}[\{ x'[t] == -24 \bullet x[t],$$
$$y'[t] == 24 \bullet x[t] - 6 \bullet y[t] - 0{,}122 \bullet y[t],$$
$$z'[t] == 6 \bullet y[t] - 1{,}8 \bullet z[t] + 0{,}122 \bullet n[t],$$
$$k'[t] == 1{,}8 \bullet z[t] - 1 \bullet k[t],$$
$$n'[t] == 0{,}122 \bullet y[t] - 0{,}122 \bullet n[t] + 8{,}32 \bullet a[t] - 10{,}5 \bullet n[t] + 0{,}0347 \bullet b[t] - 1{,}63 \bullet n[t] + 0{,}000019 \bullet c[t] - 0{,}0735 \bullet n[t] + 0{,}092 \bullet La[t] - 0{,}367 \bullet n[t] + 0{,}00019 \bullet Lb[t] + 0{,}00038 \bullet g[t] - 0{,}0122 \bullet n[t] - 2{,}94 \bullet n[t] - 15{,}43 \bullet n[t] + 0{,}0693 \bullet r[t] - 1{,}63 \bullet n[t] + 0{,}0000821 \bullet o[t] + 0{,}0693 \bullet v[t] - 2{,}04 \bullet n[t] + 0{,}000493 \bullet q[t] + 0{,}347 \bullet RBC[t] - 0{,}245 \bullet n[t],$$
$$La'[t] == 0{,}367 \bullet n[t] - 0{,}092 \bullet La[t] - 0{,}00693 \bullet La[t],$$
$$Lb'[t] == 0{,}00693 \bullet La[t] - 0{,}00019 \bullet Lb[t],$$
$$g'[t] == 0{,}0122 \bullet n[t] - 0{,}00038 \bullet g[t],$$
$$a'[t] == 10{,}5 \bullet n[t] - 8{,}32 \bullet a[t],$$
$$b'[t] == 1{,}63 \bullet n[t] - 0{,}0347 \bullet b[t],$$
$$c'[t] == 0{,}0735 \bullet n[t] - 0{,}000019 \bullet c[t],$$
$$Up'[t] == 2{,}94 \bullet n[t] - 0{,}099 \bullet Up[t],$$
$$Ub'[t] == 15{,}43 \bullet n[t] + 0{,}099 \bullet Up[t] - 12 \bullet Ub[t],$$
$$r'[t] == 1{,}63 \bullet n[t] - 0{,}0693 \bullet r[t] - 0{,}0693 \bullet r[t] + 0{,}0173 \bullet p[t],$$
$$p'[t] == 0{,}0693 \bullet r[t] - 0{,}0173 \bullet p[t] - 0{,}00578 \bullet p[t],$$
$$o'[t] == 0{,}00578 \bullet p[t] - 0{,}0000821 \bullet o[t],$$
$$v'[t] == 2{,}04 \bullet n[t] - 0{,}0693 \bullet v[t] - 0{,}0693 \bullet v[t] + 0{,}0173 \bullet w[t],$$
$$w'[t] == 0{,}0693 \bullet v[t] - 0{,}0173 \bullet w[t] - 0{,}00578 \bullet w[t],$$
$$q'[t] == 0{,}00578 \bullet w[t] - 0{,}000493 \bullet q[t],$$
$$RBC'[t] == 0{,}245 \bullet n[t] - 0{,}347 \bullet RBC[t],$$
$$u'[t] == 12 \bullet Ub[t],$$
$$x[0] == 1, y[0] == 0, z[0] == 0, k[0] == 0, a[0] == 0, b[0] == 0, c[0] == 0, n[0] == 0, La[0] == 0, Lb[0] == 0, g[0] == 0, Up[0] == 0, Ub[0] == 0, r[0] == 0, p[0] == 0, o[0] == 0, v[0] == 0, w[0] == 0, q[0] == 0, RBC[0] == 0, u[0] == 0 \},$$
$$\{ x[t], y[t], z[t], k[t], La[t], Lb[t], c[t], n[t], a[t], b[t], g[t], Up[t], Ub[t], r[t], p[t], o[t], v[t], w[t], q[t], RBC[t], u[t] \}, t]$$

Коэффициенты перед функциями в правых частях уравнений представляют собой скорости перехода между соответствующими камерами биокинетической модели. Знак минус в правой части уравнения означает, что активность убывает из камеры. Знак плюс – активность поступает в камеру.

Результатом решения данной системы уравнений являются функции, которые описывают изменения активности в определенных органах и тканях. Для примера, ниже представлена функция $u(t)$, описывающая интегральное выведение активности с мочой. Функция $u(t)$ имеет следующий вид:

$$u(t) = 0{,}00112691 \bullet e^{-38t} - 0{,}00634602 \bullet e^{-24t} + 0{,}0136746 \bullet e^{-12t} + 0{,}0777452 \bullet e^{-6t} - 0{,}0985556 \bullet e^{-5{,}4t} - 0{,}000121418 \bullet e^{-0{,}34t} - 0{,}000443065 \bullet e^{-0{,}14t} - 0{,}000119996 \bullet e^{-0{,}099t} - 0{,}00311896 \bullet e^{-0{,}097t} - 0{,}00136117 \bullet e^{-0{,}03t} - 0{,}0013873 \bullet e^{-0{,}013t} - 0{,}000422883 \bullet e^{-0{,}0005t} - 0{,}0000144957 \bullet e^{-0{,}0004t} - 0{,}0000265272 \bullet e^{-0{,}0002t} - 0{,}000346504 \bullet e^{-0{,}0001t} - 0{,}0000794166 \bullet e^{-0{,}0001t} + 0{,}0197967, \quad (1)$$

здесь t – время после поступления, сутки.

На практике используется не интегральное выведение активности (1), а величина активности в суточной моче на определенный момент времени. Величина активности в суточной пробе мочи на момент времени t может быть рассчитана согласно выражению:

$$A_U(t) = u(t) - u(t-1) \quad (2)$$

В дальнейшем, для удобства, разница функций $u(t) - u(t-1)$ обозначается как *m(t)*. Т. к. расчеты проводились на поступление с активностью 1 Бк, функция *m(t)* представляет собой долю активности от начального поступления, которая содержится в суточной моче в различные моменты времени.

Аналогично рассчитывается функция в любом органе или ткани (легкие, печень, скелет) для любого радионуклида. Сумма функций, описывающих изменение активности в каждом органе или ткани, представляет собой функцию удержания во всем теле.

Расчет эффективной дозы внутреннего облучения в случае однократного поступления урана рассчитывается согласно выражению:

$$D = \frac{A_{Urina}}{m(t)} \bullet d$$

здесь A_{Urina} – абсолютная активность в суточной моче на момент времени *t*, *m(t)* – функция выведения урана с мочой для того или иного пути поступления (при соответствующих параметрах поступления: коэффициент всасывания, класс растворимости и др.), *d* – дозовый коэффициент для соответствующего пути поступления.

Величина A_{Urina} – определяется экспериментально (независимо каким методом), функция *m(t)* рассчитывается с помощью биокинетических моделей, дозовый коэффициент может быть заимствован из библиотеки дозовых коэффициентов МКРЗ.

Время, на которое была рассчитана доза внутреннего облучения, отсчитывается от момента поступления.

При расчете дозы внутреннего облучения при хроническом поступлении предполагается, что поступление происходит равномерно. В этом случае хроническое поступление можно представить как суперпозицию однократных поступлений.

Функцию *m(t)* для хронического поступления можно представить в виде суммы:

$$m_{cron}(T) = \sum_{i=1}^{T} m(T + b - i)$$

T – продолжительность хронического поступления, *b* – время, прошедшее после окончания хронического поступления и момента сдачи суточной пробы мочи. Здесь под знаком суммы стоит функция *m(t)* для однократного поступления. Для расчета эффективной дозы в случае хронического поступления необходимо иметь непосредственно функциональную зависимость *m(t)* подобную выражению (2).

Расчет эффективной дозы внутреннего облучения в случае хронического поступления проводится согласно выражению:

$$D = \frac{T \bullet A_{Urina}}{\sum_{i=1}^{T} m(T + b - i)} \bullet d$$

здесь *T* – период хронического поступления (сутки), A_{Urina} – активность урана в суточной моче (Бк), *b* – время, прошедшее после окончания хронического поступления и момента сдачи суточной пробы мочи, *d* – дозовый коэффициент, соответствующий данному пути поступления (Зв/Бк).

Значение дозового коэффициента, как и в случае однократного поступления, берется из библиотеки дозовых коэффициентов МКРЗ.

Вышеизложенная методика дает представление о сложности подобных расчетов. Системы дифференциальных уравнений, построенные на основании сочленения нескольких биокинетических моделей (например, респираторный тракт и ЖКТ) могут насчитывать не один десяток уравнений, а количество констант растет пропорционально количеству камер биокинетической модели. Вывести функцию из уже имеющейся системы дифференциальных уравнений, используя специализированное ПО, такое как Wolfram Mathematica 9.0, не составляет труда. Однако, само составление подобных систем является процессом весьма трудозатратным и сопряжено с ошибками под воздействием человеческого фактора. Разработанное ПО Bioscheme призвано избавить пользователя от трудоемкого процесса компиляции систем дифференциальных уравнений, автоматизируя этот процесс.

Результаты и их обсуждение

Программное обеспечение было создано в интегрированной среде разработки Embarcadero RAD Studio 10.4 и состоит из БД и пользовательского интерфейса для ввода/вывод данных и расчета дозы.

За основу пользовательского интерфейса был взят таковой от ПО MONDAL3 [4], так как он является весьма удобным. В дальнейшем интерфейс будет улучшаться и в последствии приобретет аутентичность. Так, например, первым улучшением в интерфейсе главного окна программы явилась панель прогресса, а также строка состояния, отображающая статус обработки данных. Главное окно пользовательского интерфейса представлено на рисунке (рис. 1).

БД ПО Bioscheme содержит константы для скоростей переходов по данным МКРЗ. Пользовательский интерфейс позволяет выбрать начальные параметры, такие как путь поступления, скорость всасывания и т. д., от которых будет зависеть массив констант, передаваемых из БД на этап обработки данных.

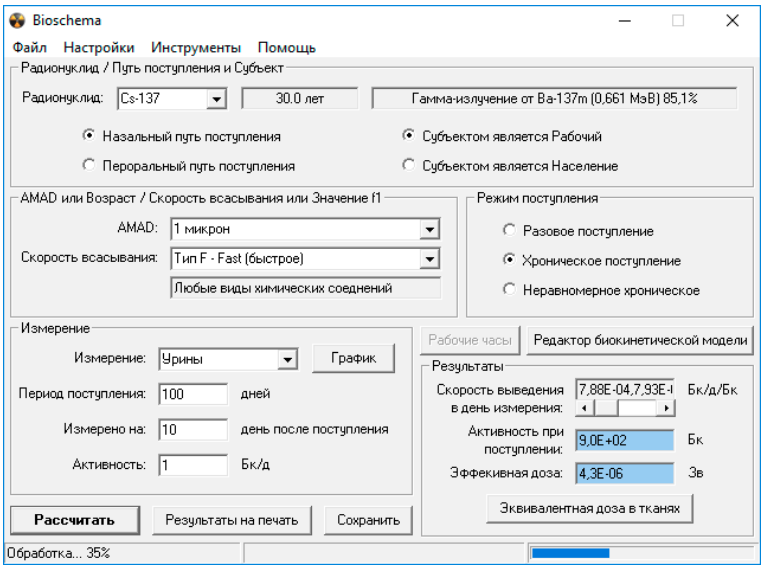


Рис. 1. Главное окно пользовательского интерфейса ПО Bioscheme

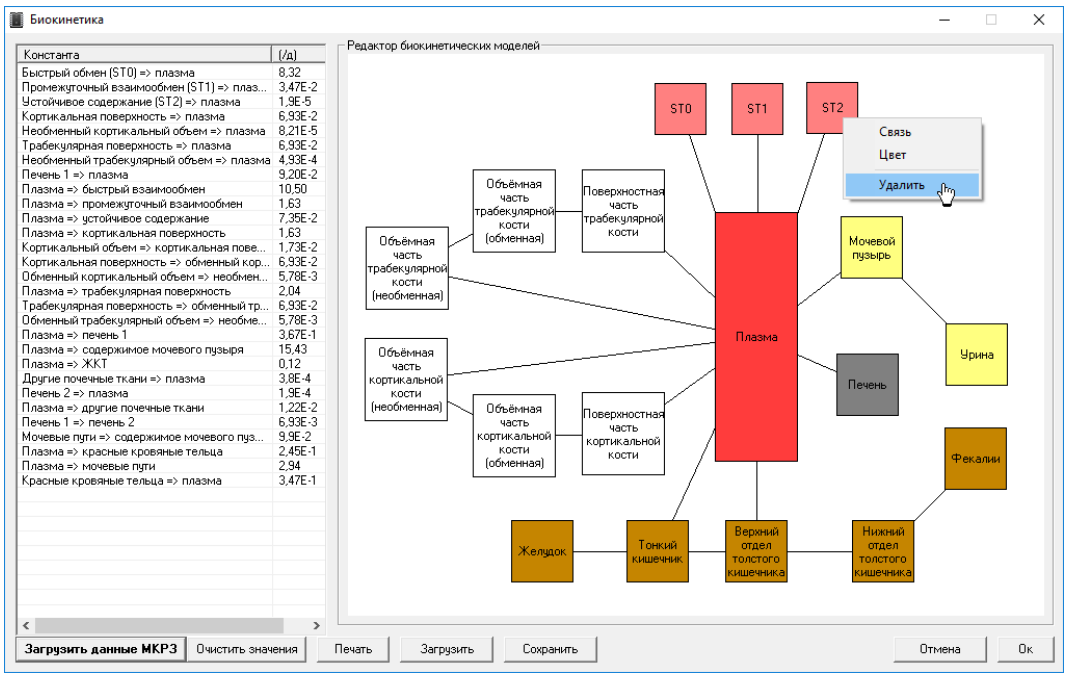


Рис. 2. Модальное окно редактора биокинетических моделей

Перед этапом обработки данных пользователь имеет возможность вызвать модальное окно «Биокинетика» (рис. 2), которое представляет собой графический редактор, позволяющий вносить изменения в структуру биокинетической модели, т. е. удалять/добавлять элементы блок-схемы, описывающей выбранную биокинетическую модель. Данное модальное окно также предоставляет пользователю возможность изменить константы скоростей переходов по своему усмотрению. Первоначальные значения для констант берутся из встроенной БД на основании параметров поступления, заданных пользователем.

После ввода всех параметров и нажатия кнопки «Рассчитать» на главном окне, программа автоматически составит систему дифференциальных уравнений на основании блок-схемы биокинетической модели и значений констант, полученных из БД или введенных пользователем. Как уже упоминалось ранее, вывод функций изменения активности радионуклида в органах и тканях осуществляется автоматически. На основании выведенных функций программа рассчитывает эквивалентные дозы для каждого органа, вошедшего в биокинетическую модель, а также эффективную дозу и активность в момент поступления.

Полученные результаты для выбранных органов или тканей могут быть представлены как в виде таблицы с данными об активности радионуклида на

каждый день с момента поступления, так и в виде графиков для функций выведения/удержания. Все результирующие данные, ровно, как и форма с исходными данными могут быть отправлены на печать.

Заключение

Разработанное ПО Bioscheme представляет собой не столько полезный инструмент для дозиметристов, занимающихся радиационной защитой, сколько базовый и универсальный «конструктор» биокинетических моделей, который позволяет не только вносить изменения в существующие модели МКРЗ, но и моделировать собственные. Подобное ПО может быть полезно, например, в научных изысканиях в области биокинетики.

Разработанное ПО не перестанет быть актуальным ввиду возможности его кастомизации путем изменения биокинетических моделей. Измененные модели могут быть в последствии сохранены в отдельном файле и, при необходимости, загружены в ПО повторно.

Перспективами развития данного ПО будет является добавление новых расчетных модулей и методик, таких как метод максимального правдоподобия и других методов математической статистики. Интерфейс будет так же улучшаться и дорабатываться. В качестве ближайшего улучшения следует рассматривать добавление «режима эксперта» в меню настроек главного меню программы, который позволит пользователю просматривать построенную систему дифференциальных уравнений перед выведением функций.

Литература

1. Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 100, 2005. – 125 p.
2. Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers: Replacement of ICRP 54. ICRP 78. Ann ICRP, 1997. – Vol. 27 – № 3–4.
3. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30, 1979. – 200 p.
4. N. Ishigure. Development of Software for Supporting Internal Dose Estimation, 2004. – 2 p.
5. R. W. Leggett. Reliability of Current Biokinetic and Dosimetric Models for Radionuclides: A Pilot Study, 2008.

МИГРАЦИЯ ^{238}U В МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВАХ ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ ЮЖНОЙ ЯКУТИИ

А. П. Чевычелов, П. И. Собакин

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН
Якутск, Россия, chev.soil@list.ru

MIGRATION OF ^{238}U IN PERMAFROST SOILS OF TECHNOGENIC LANDSCAPES OF SOUTHERN YAKUTIA

A. P. Chevychelov, P. I. Sobakin

Institute of Biological Problems of the Cryolithozone SB RAS
Yakutsk, Russia, chev.soil@list.ru

The content, distribution, and migration – able forms of ^{238}U in automorphic permafrost soils – podburs and hydromorphic – alluvial soils of technogenic landscapes of Southern Yakutia were studied. The maximum accumulation of ^{238}U, 211 times higher than the background levels, is observed in the studied alluvial soils 500 m from the sources of technogenic pollution. With air scattering, ^{238}U is fixed in the upper part of the pit, and with water scattering, this radionuclide penetrates to the entire depth of the soil profile of the alluvial soil, forming 2–3 peaks of concentrations associated with buried horizons. The total content of migration-capable forms of ^{238}U in the mineral horizons of the podbur does not exceed 15 % of its total content, whereas in alluvial soil it is always higher than 30 %.

Введение

Наши исследования проводились в Эльконском урановорудном районе (ЭУРР), расположенном в центральной части Алданского кристаллического щита на территории Южной Якутии. В настоящее время в районе выявлено 24 месторождения урана и 91 рудопроявление [4]. Основная часть крупномасштабных геолого-поисковых работ была проведена здесь в последней трети XX в. В ходе этих работ, по данным Госатомнадзора Дальневосточного округа

РФ, в процессе детальной геологической разведки было извлечено из недр и складировано на дневную поверхность в виде отвалов более 1 млн т горнорудной массы. Общее количество урана, содержащегося в данной рудной массе, составляет около 2000 т. Это исходно предполагает значительное радионуклидное загрязнение почвенно-растительного покрова и поверхностных вод в зоне влияния отвалов, что подтверждается последними исследованиями [13, 14].

Целью данной статьи являлось изучение содержания и распределения, а также форм миграции ^{238}U в мерзлотных почвах техногенных ландшафтов исследуемого района.

Объекты и методы

Объектами наших исследований являлись мерзлотные автоморфные – подбуры и гидроморфные – аллювиальные почвы техногенных и природных ландшафтов ЭУРР. Данный район геоморфологически приурочен к Эльконскому горсту, представляющему горное поднятие на Алданском нагорье, характеризующееся низко- и среднегорным рельефом и преобладанием в растительном покрове горно-таежной растительности. Климат исследуемой территории – континентальный, холодный гумидный и супергумидный. В почвенном покрове региона в автоморфных позициях формируются подзолы и подбуры, а в поймах рек и ручьев – аллювиальные почвы.

При проведении работ использовали общепринятые почвенные методы исследований: сравнительно-географический, профильно-генетический, сравнительно-аналитический и геохимический [3, 11, 12]. Химический состав и свойства почв определяли по методикам, принятым в почвоведении [1]. В изучаемых почвах в условиях радиоактивного равновесия ^{238}U определяли γ-спектрометрическим методом по дочернему ^{226}Ra на многоканальном анализаторе «Прогресс-Гамма» со сцинтилляционным детектором NaJ (Tl) размером 63 × 63 мм, с 7,3 % разрешением по γ-линии ^{137}Cs (666 Кэв). Обработку γ-спектров осуществляли матричным методом с помощью программного обеспечения «Прогресс» [6], максимальная погрешность измерения не более ± 30 %. Также уран определяли рентгеноспектральным методом

Таблица 1. Содержание ^{238}U в аллювиальных почвах Южной Якутии в техногенных зонах на различном удалении от источников радиоактивного загрязнения

Координаты и местоположение, № разреза и название почвы	Глубина, см	Горизонт	Содержание ^{238}U, мг/кг	Кпр*
N58°40'08,3", E126°14'35,6", h = 662,0 м. Пойма руч. Пропадающего, дренирующего отвалы участка Курунг 1, в 500 м от начала отвалов. Разрез 2Г-06, почва: аллювиальная темногумусовая	0–3	A0A1	524	175
	4–14	A1	1000	333
	18–28	BC	161	54
	32–42	BC	282	94
	42–52	[AB]	1120	373
	Среднее **		633	211
N58°42'11,8", E126°15'29,9", h = 627,9 м. То же, в 1350 м от начала отвалов на участке сухого русла данного ручья. Разрез 1Г-06, почва: аллювиальная слоистая	0–1	A0	425	142
	1–4	A1	467	156
	4–9	BC1	27	9
	9–11	[AB]	121	40
	15–25	C1	11	3,7
	35–45	C1	23	7,7
	55–65	C2	89	30
	Среднее		88	29
N58°42'46,0", E126°18'16,4", h = 542,8 м. Пойма в долине среднего течения р. Курунг, остров в 8 км от отвалов участка Курунг 1 вниз по течению. Разрез 6ЭГ-03, почва: аллювиальная темногумусовая	0–2	A0	2	0,7
	2–8	A1	3	1
	8–11	B	9	3
	11–14	[AB]	6	2
	14–19	BC	2	0,7
	19–29	CD	3	1
	Среднее		3,7	1,2

* Значения коэффициентов превышения над фоновым уровнем; ** средневзвешенное значение для почвенного профиля.

на приборе АРФ-6М, порог чувствительности которого при определении данного элемента составляет 2 мг/кг, при погрешности определения ± 10 % [7].

Миграционноспособные формы ^{238}U извлекали согласно методике, предложенной в работе [2]. Определение содержания урана в данных вытяжках осуществляли лазерно-люминесцентным методом на флюорометре АУФ-101 «Ангара» [10]. Чувствительность определения урана составляла $2 \cdot 10^{-8}$ г/л, погрешность анализа не превышала ± 15 %.

Результаты и их обсуждение

Мы изучали содержание и внутрипрофильное распределение ^{238}U в трех почвенных разрезах аллювиальных почв (табл. 1). При этом два из них (разр. 1Г-06 и разр. 2Г-06) были заложены на низкой пойме ручья Пропадающего, дренирующего радиоактивные отвалы на участке месторождения Курунг зоны Южная, на различном расстоянии от начала отвалов. Третий разрез (разр. 6ЭГ-03) был заложен на высокой пойме среднего течения р. Курунг, примерно в 8 км ниже по течению от данного участка. Интенсивность накопления урана в почвах оценивалась на основе его средневзвешенного значения, отнесенного к мощности отдельных почвенных горизонтов (слоев) и содержания в них данного радионуклида. В качестве фонового значения для данных почв принято содержание урана равное 3 мг/кг.

Внутрипрофильное распределение урана во всех трех почвенных разрезах неравномерное, что связано со слоистостью состава и свойств (табл. 2), которая является генетическим признаком пойменных (аллювиальных) почв [5]. В почве разр. 2Г-06 отмечается два почти равнозначных по содержанию максимума в распределении ^{238}U на глубине 4–14 и 42–52 см. В почве разр. 1Г-06 распределение данного радионуклида имеет еще более сложный характер: выделяется основной максимум (467 мг/кг) на глубине 1–4 см, затем меньший по значению пик содержания (121 мг/кг) на глубине 9–11 см и, наконец, еще меньший по содержанию пик (89 мг/кг) на глубине 55–65 см. В почвенном профиле разр. 6ЭГ-03 зафиксирован всего один пик содержания урана на глубине 8–11 см в горизонте В над погребенным горизонтом АВ. Сопоставление распределения ^{238}U в исследуемых почвах (табл. 1) с анализом их свойств (табл. 2) указывает на то, что увеличение содержания данного радионуклида в почвах целиком совпадает с характером распределения гумуса, а также фракций

Таблица 2. Физико-химические свойства исследуемых аллювиальных почв

Горизонт	Глубина, см	pH		Гумус, %	Фракции, %	
		H_2O	KCl		< 0,01 мм	< 0,001 мм
Аллювиальная темногумусовая, разрез 2Г-06						
A0A1	0–3	5,8	5,0	–	–	–
A1	4–14	5,9	5,0	12,7	17,2	5,8
BC	18–28	6,4	5,4	3,7	11,2	3,4
BC	32–42	6,1	5,2	5,1	11,5	3,3
[AB]	42–52	6,0	5,0	18,8	16,5	6,8
Аллювиальная слоистая, разрез 1Г-06						
A0	0–1	6,5	5,8	–	–	–
A1	1–4	6,3	5,5	25,4	–	–
BC1	4–9	6,7	5,6	2,4	6,0	3,4
[AB]	9–11	6.0	4,9	10,8	7,2	3,9
C1	15–25	6,8	5,7	0,6	5,3	2,6
C1	35–45	6,3	5,1	2,6	4,6	2,7
C2	55–65	6,1	4,9	3,8	10,5	4,5
Аллювиальная темногумусовая, разрез 6ЭГ-03						
A0	0–2	6,4	6,0	–	–	–
A1	2–8	6,1	5,6	36,7	–	–
B	8–11	6,0	5,2	7,9	9,5	7,8
[AB]	11–14	5,5	5,2	20,7	15,2	8,7
BC	14–19	6,2	5,2	1,4	6,6	3,8
СД	19–29	6,0	5,1	1,4	7,4	5,8

Прочерк – значение показателя не определено.

физической глины (< 0,01 мм) и ила (< 0,001 мм). Это однозначно указывает на то, что уран в исследуемых техногенных мерзлотно-таежных ландшафтах мигрирует в составе растворенного органического вещества и затем аккумулируется в аллювиальных почвах в составе почвенного органического вещества. Интенсивность накопления данного радионуклида в исследуемых аллювиальных почвах падает по мере удаления от радиоактивных отвалов, что полностью подтверждается значениями коэффициента превышения над фоновым уровнем (Кпр). Так, если на расстоянии 500 м от отвалов (разр. 2Г-06) Кпр равен 211, то в 1350 м (разр. 1Г-06) Кпр равен 29, а в почве разр. 6ЭГ-03 на расстоянии 8 км от источника загрязнения отмечается уже только фоновое содержание ^{238}U (Кпр = 1,2).

В ходе проведенных исследований нами также было оценено распределение общего содержания ^{238}U и его миграционноспособных форм в двух типах почв исследуемого региона (табл. 3, 4). При этом были выделены следующие формы ^{238}U: 1 – водорастворимая; 2 – обменная; 3 – кислотнорастворимая; 4 – остаточная (неизвлекаемая), полученная по разности общего содержания ^{238}U и его количества, суммарно перешедшего в состав форм 1–3 (табл. 4).

Исследуемые типы почв (табл. 3) характеризуют разные виды техногенной миграции ^{238}U в ландшафтах данного региона, так в подбуре отмечается аэротехногенно-аккумулятивный тип профильного распределения ^{238}U, а в аллювиальной почве – гидрогенно-аккумулятивный. При этом, поступающий на поверхность подбура уран посредством эолового переноса закрепляется в верхней части почвенного профиля в слое 0–8 см, в горизонте В его содержание уже выходит на фоновый уровень, составляющий для данной почвы 3,5 мг/кг. Значения коэффициентов Кпр изменяются от 1,3 до 11,5 (табл. 3). Напротив, в аллювиальной почве, где ^{238}U накапливается посредством водной миграции, отмечается более сложный характер аккумуляции данного элемента. Так, он достаточно интенсивно накапливается здесь в системе поверхностных горизонтов А0–АВ в слое 0–18 см, где значения Кпр изменяются в переделах 7,5–28,3, затем в гор. ВС–CD в слое 18–40 см выходит на фоновый уровень (4,0 мг/кг), а ниже в погребенном горизонте ACD в слое 45–58 см отмечается второй максимум в накоплении ^{238}U, где Кпр достигает значения 11. Таким образом, в аллювиальной почве по сравнению с подбуром отмечается более интенсивная внутрипрофильная аккумуляция ^{238}U как в верхней, так и нижней части почвенного профиля. Это соответствует общим геохимическим принципам миграции урана в гумидных ландшафтах в условиях кислой окислительной обстановки, когда согласно [8] данный элемент накапливается в торфяниках и аллювиальных глинах. Необходимо также подчеркнуть, что в условиях исследуемых техногенных ландшафтов накопление ^{238}U в почвенно-растительном покрове посредством воздушной миграции отмечается на расстоянии 1 км, а водной на удалении до 2 км от источников радиоактивного загрязнения.

Данные почвы также весьма различаются по соотношению и по характеру внутрипрофильного распределения миграционноспособных форм ^{238}U (табл. 4). Так, в подбуре содержание водорастворимого урана (0,3–2,2 %) несколько больше, чем в аллювиальной почве (0,2–0,7 %) и в то же время в последней почве значительно выше содержание обменной (6,3–32,1 %) и кислотнорастворимой (3,3–31,0 %) форм по сравнению с первой соответ-

Таблица 3. Общее содержание и распределение ^{238}U в исследуемых почвах

N п/п	Глубина, см	Горизонт	Содержание ^{238}U, мг/кг	Значение Кпр
Подбур оподзоленный, разрез 4-02Э				
1	0–2	A0	40,2	11,5
2	2–5	A0A1	15,4	4,4
3	5–8	A1A2	4,6	1,3
4	8–14	B	3,4	1,0
5	14–19	BC	3,8	1,1
6	19–37	CD	3,2	0,9
Аллювиальная темногумусовая, разрез 5-02Э				
7	0–1	A0	30,0	7,5
8	1–2	A0A1	104,0	26,0
9	2–18	AB	113,1	28,3
10	18–24	BC	3,8	1,0
11	30–40	CD	4,2	1,0
12	45–58	[ACD]	43,9	11,0

Таблица 4. Миграционноспособные формы ^{238}U в почвах, % от общего содержания

Глубина, см	Горизонт	Формы урана, %			
		1	2	3	4
Подбур оподзоленный, разрез 4-02Э					
0–2	A0	0,3	1,4	1,3	97,0
2–5	A0A1	0,5	5,5	6,7	87,3
5–8	A1A2	1,7	3,7	5,4	89,2
8–14	B	1,8	3,8	5,6	88,8
14–19	BC	1,6	4,2	7,4	86,8
19–37	CD	2,2	5,0	5,3	87,5
Аллювиальная темногумусовая, разрез 5-02Э					
0–1	A0	0,7	6,3	3,3	89,7
1–2	A0A1	0,3	19,2	13,5	67,0
2–18	AB	0,2	22,1	12,4	65,3
18–24	BC	0,2	15,7	15,8	68,3
30–40	CD	0,3	15,0	31,0	53,7
45–58	[ACD]	0,3	32,1	25,7	41,9

ственно (1,4–5,5 % и 1,3–7,4 %). При этом, суммарное содержание миграционноспособных форм ^{238}U в минеральной толще подбура не превышает 15 %, тогда как в минеральных горизонтах аллювиальной почвы оно всегда выше 30 % и достигает максимальных значений в нижней части профиля (горизонты CD и ACD), почти 50–60 %. Последнее положение хорошо согласуется с особенностями геохимии урана в поверхностных водах гумидных горно-таежных ландшафтов криолитозоны, когда его повышенная миграционная способность целиком объясняется возможностью комплексирования с растворенным органическим веществом. Так, по данным А. И. Перельмана [7] в ультрапресных водах горной тайги Якутии РОВ составляет от 10 до 75 % общей суммы растворенных веществ, а главным компонентом РОВ являются фульвокислоты – гумусовые вещества.

Выводы

В техногенных горно-таежных гумидных ландшафтах Эльконского ураново-рудного района на территории Южной Якутии отмечается масштабная миграция ^{238}U из состава радиоактивных отвалов горных пород. При этом, как общее распределение урана в почвах, так и соотношение его миграционноспособных форм четко диагностируют два различных вида его техногенной миграции в исследуемых горно-таежных ландшафтах – аэротехногенно-аккумулятивный и гидрогенно-аккумулятивный.

Интенсивность накопления ^{238}U в почвах (значения коэффициентов Кпр) снижается по мере удаления от радиоактивных отвалов горных пород, при этом в 500 м от отвалов Кпр = 211, а в 1350 м – Кпр = 29, в 8 км – Кпр = 1,2. Внутрипрофильное распределение ^{238}U в аллювиальных почвах неравномерное, с 2 или даже 3 пиками увеличения его концентраций. При этом увеличение количества урана наблюдается, как правило, в погребенных почвенных горизонтах, где также отмечается повышение содержания гумуса, а также фракций физической глины и ила.

Накопление ^{238}U в почвенно-растительном покрове исследуемых гумидных ландшафтов посредством воздушной миграции отмечается на расстоянии 1 км, а водной – на удалении до 2 км от источников радиоактивного загрязнения. Суммарное содержание миграционноспособных форм ^{238}U в минеральных горизонтах подбура не превышает 15 % от его общего содержания, тогда как в аллювиальной почве оно всегда выше 30 %.

Статья подготовлена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту (тема № 0297-2021-0027, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21-121012190033-5).

Литература

1. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. – 488 с.

2. Архипов Н. П., Федорова Т. А., Февралева Л. Т. Соотношение форм соединений тяжелых естественных радионуклидов в почвах // Почвоведение, 1986. – № 1. – С. 69–73.

3. Гагина Н. В., Федорцова Т. А. Методы геоэкологических исследований: Курс лекций. – Минск: БГУ, 2002. – 98 с.
4. Горошко М. В., Малышев Ю. Ф., Кириллов В. Е. Металлогения урана Дальнего Востока России. – М.: Наука, 2006. – 372 с.
5. Добровольский Г. В. Почвы речных пойм центра Русской равнины. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1968. – 296 с.
6. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс». – М.: Центр метрологии, 2003. – 16 с.
7. Определение урана рентгеноспектральным методом. – М.: Мингео СССР, 1983. – 10 с.
8. Перельман А. И. Геохимия природных вод. – М.: Наука, 1982. – 152 с.
9. Перельман А. И. Геохимия. – М.: Высшая школа, 1989. – 528 с.
10. Радиогеохимические исследования. Методические рекомендации / Под ред. А. А. Смыслова. – М.: Мингео СССР, 1974. – 139 с.
11. Роде А. А. Система методов исследования в почвоведении. – Новосибирск: Наука, 1971. – 92 с.
12. Розанов Б. Г. Морфология почв. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. – 320 с.
13. Chevychelov A. P., Sobakin P. I. Radioactive Contamination of Alluvial Soils in the Taiga Landscapes of Yakutia with ^{137}Cs, ^{226}Ra, and ^{238}U // Eurasian Soil Science, 2017. – V. 50. – № 12. – P. 1535–1544.
14. Sobakin P. I., Chevychelov A. P., Gerasimov Y. R. Migration of natural radionuclides in surface waters in the El'kon uranium mining district, Southern Yakutia // Geochemistry International, 2015. – № 11. – P. 1032–1042.

УРАН И ТОРИЙ В УГЛЯХ КАЙНОЗОЙСКИХ ВПАДИН ПРИМОРЬЯ

И. Ю. Чекрыжов[1], Н. Ю. Попов[1], С. И. Арбузов[2]

[1]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН
Владивосток, Россия, chekr2004@mail.ru
[2]Томский политехнический университет
Томск, Россия, siarbuzov@mail.ru

URANIUM AND THORIUM IN THE COALS OF THE CAINOZOIC BASINS OF PRIMORYE

I. Yu. Chekryzhov[1], N. Yu. Popov[1], S. I. Arbuzov[2]

[1]Far Eastern Geological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences
Vladivostok, Russia, chekr2004@mail.ru
[2]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, siarbuzov@mail.ru

The content and distribution of uranium and thorium in the coals of seven Cenozoic brown coal deposits, characterized by different metal content and located in different geological structures of Primorye, have been studied. Coals with high uranium contents and abnormally low thorium-uranium ratio have been found within the Voznesensk terrane at two brown coal and one germanium-coal deposit. It is noted that anomalous uranium accumulations are characteristic mainly of low-ash coal layers and have a hydrogenic genesis associated with the removal of the basin framing from granites.

Введение

На территории Приморья известно около 50 кайнозойских впадин, большинство из которых характеризуются промышленной угленосностью. В них сосредоточена значительная часть разведанных мировых запасов германия [6, 8]. Также, в осадочных и вулканогенно-осадочных угленосных комплексах впадин установлены многочисленные проявления благородно- и редкометалльной минерализации, в том числе таких радиоактивных элементов как уран и торий [5, 8, 11 и др.]. Целью работы была оценка содержаний урана и тория в углях семи кайнозойских буроугольных месторождений, характеризующихся различной металлоносностью и расположенных в различных геологических структурах Приморья. Также были рассмотрены особенности переноса и накопления урана и тория из пород обрамления в угленосные отложения.

Краткая характеристика изученных месторождений

Изученные буроугольные месторождения приурочены к наложенным кайнозойским впадинам в пределах трех террейнов, сложенных различными

по составу докайнозойскими комплексами пород (рис. 1). Возновское и Ванчинское месторождения расположены в прибортовых частях Зеркальненской и Ванчинской вулкано-тектонических впадин и находятся на площади таухинского террейна, представленного преимущественно терригенными и вулкано-терригенными морскими и прибрежно-морскими отложениями раннемеловой акреционной призмы, в зоне влияния наложенного верхнемелового Восточного Сихотэ-Алинского вулканического пояса. Обрамление впадин сложено вулканитами преимущественно кислого состава. Вулканогенные, в основном пирокластические отложения кислого и основного состава, также присутствуют и в составе угленосных отложений эоцен-олигоценового возраста и отражают кайнозойский субсинхронный угленакоплению этап вулканизма. Угли месторождений преимущественно витринитовые марки 3БВ. В углях Возновского месторождения ранее было зафиксировано повышенное содержание Zr, Nb, Ta, а также лантаноидов и иттрия (РЗЭ), обогащающих приконтактовые к тонштейну угли [1]. Угли Ванчинской впадины известны своей металлоносностью и содержат повышенные концентрации РЗЭ, Au и Ge [9]. На Возновском и Ванчинском месторождениях опробованы по одному безымянному угольному пласту.

Нежинское, Раковское и Павловское буроугольные месторождения, а также германий-угольное месторождение Спецугли расположены в пределах Пушкинской, Раковской и Павловской наложенных тектонических впадин и находятся на площади Вознесенского террейна, сложенного гетерогенными преимущественно палеозойскими отложениями и гранитами. Фундамент и борта Пушкинской впадины представлены верхнемеловыми терригенными и вулкано-терригенными отложениями. Угленосные отложения олигоценового возраста в пределах месторождения перекрыты миоценовыми вулканогенно-осадочными отложениями и плиоценовыми платобазальтами. Обрамление и фундамент близрасположенных Павловской и Раковской впадин сложены преимущественно палеозойскими гранитами и кембрийскими осадочно-вулканогенными метаморфизованными отложениями. Угли месторождений слабометаморфизованные (марки Б1и Б2). Угленосные отложения Павловской впадины вмещают одно из крупнейших в мире месторождений германия (Спецугли), здесь также известны аномальные накопления W, Mo, Sb, Hg, As, Li, Rb, Cs, Be, U, Y, лантаноидов, Zn и Ga в германиеносных и энергетических углях [3, 4, 6, 8]. В Раковской впадине, наряду с твердым топливом, обнаружены месторождения

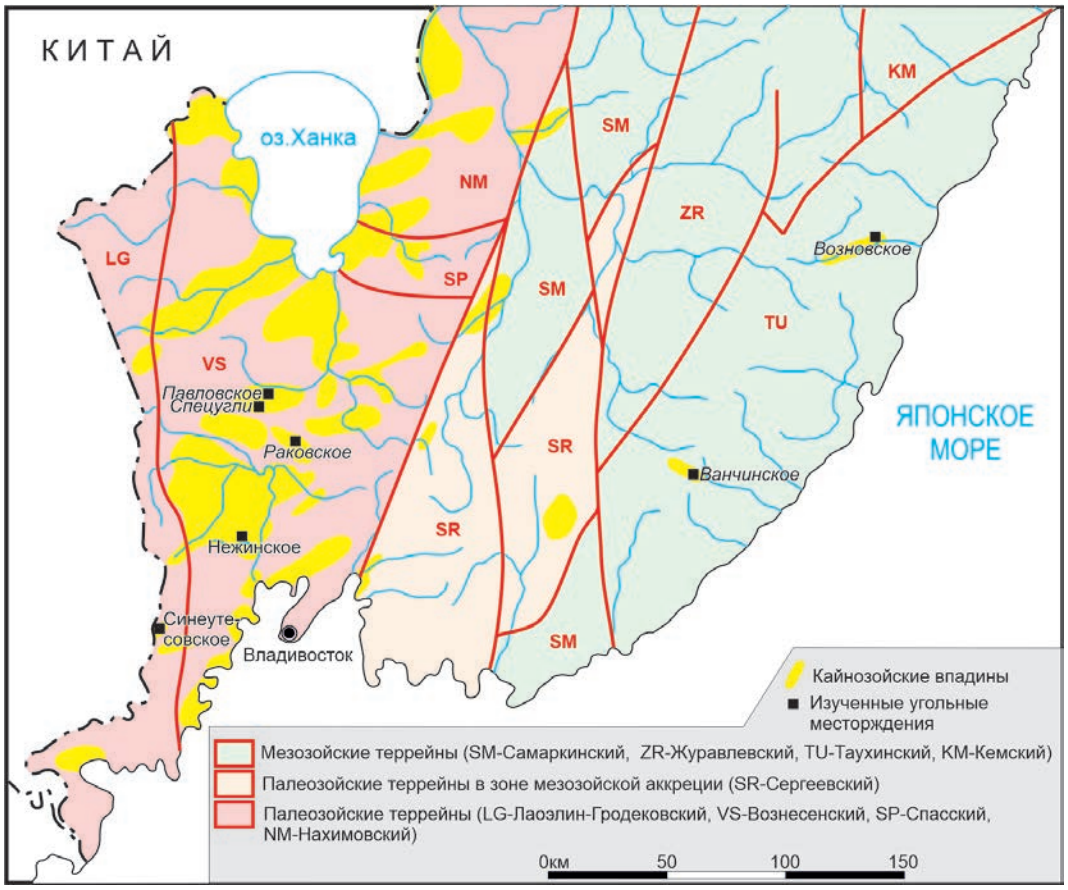


Рис. 1. Схема расположения изученных месторождений. Докайнозойские террейны даны по (Ханчук и др., 1995)

и рудопроявления урана, германия и РЗЭ, залегающие как в угольных пластах, так и вмещающих их слаболитифицированных кайнозойских отложениях, а также в кристаллических породах фундамента и обрамления впадины [5, 7, 11]. На Павловском месторождении был опробован угольный пласт I, на германий-угольном месторождении Спецугли пласты II нижний, II верхний III нижний. На Раковском месторождении опробован пласт III на Западном и Восточном участках.

Синеутёсовское месторождение расположено в одноименной впадине в пределах Лаоелин-Гродековского террейна, сложенного преимущественно пермскими образованиями древней островной дуги. Угленосные отложения раннемиоценового возраста вмещают угольный пласт, представленный углем марки 2БВ с прослоем слабоизмененного пеплового туфа риолитового состава. Здесь был опробован один безымянный пласт.

Материалы и методы

Пробы угля на угольных месторождениях отбирались секциями по 5–10 см от подошвы к кровле, в зависимости от литологии и мощности пластов. Состав элементов-примесей, в том числе уран и торий, изучен методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 7700x (AgilentTechn., США) в лаборатории аналитической химии Центра коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток). Содержание элементов в углях определялось с использованием двух методов пробоподготовки: с предварительным озолением и без озоления с химическим разложением, показавшими хорошую сходимость результатов по торию и урану. Для статистики отбирались пробы угля с зольностью менее 50 %.

Результаты и обсуждение

По результатам аналитических исследований установлено, что аномальные (> 15 г/т в угле) содержания урана, отмечены на трех месторождениях – Павловском, Спецугли и Раковском (Западный участок). При этом если для первых двух месторождений аномальны только единичные пробы, то для Западного участка Раковского месторождения все угли в сечении III пласта являются аномальными по урану (табл. 1).

Торий-урановое отношение для проб с рядовыми содержаниями урана резко отличается от такового для аномальных проб (рис. 2). Если для большинства проб с околокларковым и немного повышенным ураном характерно Th/U отношение от 2 до 5 и для небольшого количества проб от 1 до 2 и от 5 до 6, то для всех аномальных проб Th/U < 1, иногда значительно. Это свидетельствует о гидрогенном характере накоплении аномальных концентраций урана в углях приморских месторождений [2].

Для выяснения характера корреляции содержаний урана и тория в углях с зольностью проб были построены диаграммы распределения зольности и содержаний U и Th в сечении пласта III на Раковском месторождении (с аномальными содержаниями урана) и сечения угольного пласта на Возновском месторождении (с рядовыми содержаниями урана) (рис. 3). В обрамлении Раковской впадины залегают палеозойские редкометалльные граниты с развитыми корами выветривания и, соответственно, при благоприятных условиях сноса торфяники обогащались торием и ураном, переносимых как в кластогенной, так и растворенной формах. Корреляция с зольностью позволяет сделать вывод, что уран переносился преимущественно гидрогенным способом и нака-

Таблица 1. Th и U в рядовых и аномальных по содержанию углях месторождений Приморья

Месторождение	Число проб	A^d, %	Содержание элементов, г/т		
			уголь		
			Th	U	Th/U
Рядовые содержания (U < 15 г/т)					
Возновское	8	27,6	8,2	2,50	3,2
Ванчинское	20	25,6	9,3	3,76	2,5
Нежинское	9	19,7	6,2	1,25	4,8
Павловское	15	23,8	8,2	2,08	4,2
Раковское (Восточное)	9	30,8	22,5	7,90	2,9
Синеутесовское	9	27,0	6,2	1,50	4,3
Спецугли	25	19,0	7,1	2,52	3,3
Аномальные содержания (U > 15 г/т)					
Павловское	1	32,5	6,3	1967	> 0,01
Раковское (Западное)	9	9,77	5,3	52,5	0,10
Спецугли	1	10,27	4,0	26,5	0,15

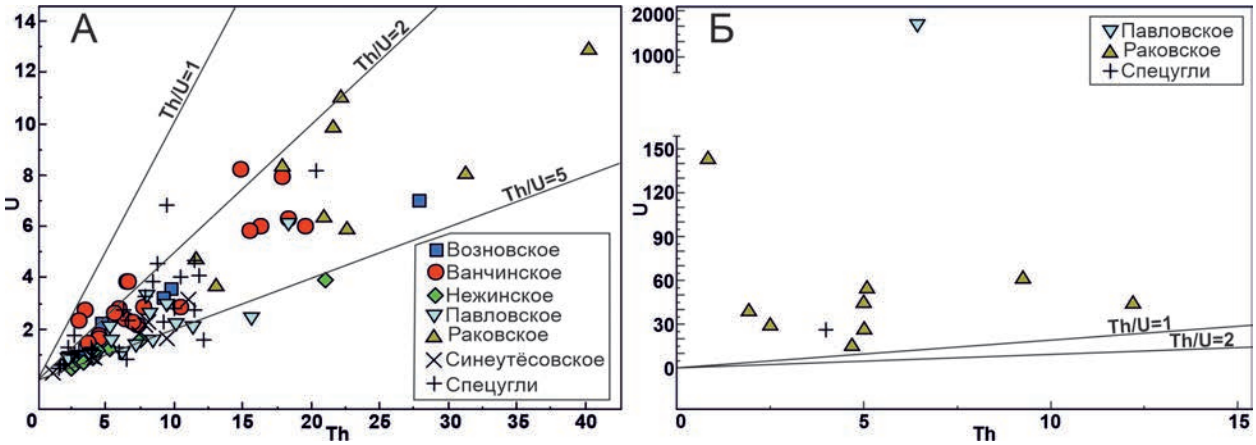


Рис. 2. Содержание урана, тория и торий-урановое отношение для проб с рядовыми (А) и аномальными (Б) содержаниями урана

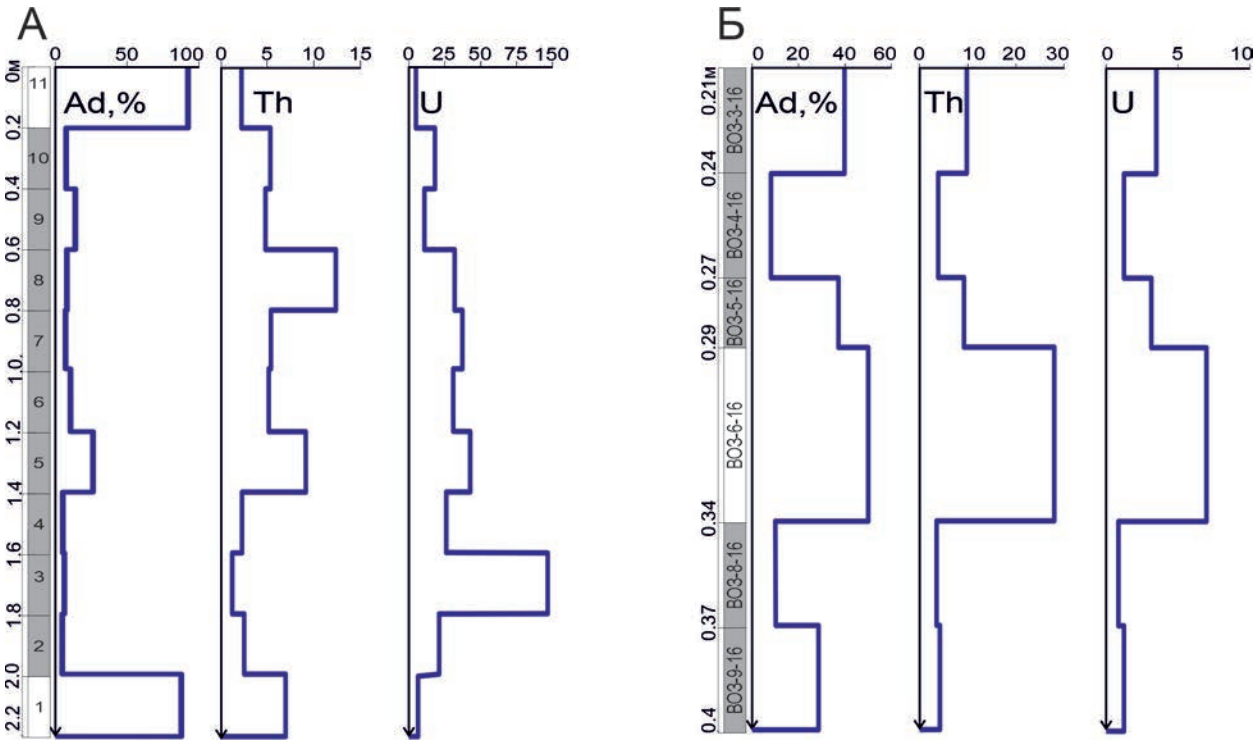


Рис. 3. Распределение зольности и содержаний U и Th в сечении пласта III на Раковском месторождении (А) и сечении пласта 1 на Возновском месторождении (Б)

пливался в органическом веществе, что для него характерно [2]. Наличие различных путей поступления радиоактивных и редкоземельных элементов в угли Раковской впадины уже были нами обоснованы ранее [11]. На обрамлении Возновского месторождения залегают кайнотипные вулканиты основного и кислого состава. Четкая положительная корреляция содержаний урана и тория с зольностью (рис. 3) и высокое торий-урановое отношение свидетельствуют о почти исключительно кластогенном их поступлении в торфяник.

Заключение

Угли с высокими содержаниями урана и аномально низким торий-урановым отношением установлены на двух буроугольных и одном германий-угольном месторождении Приморья. Аномальные накопления урана характерны преимущественно для малозольных угольных прослоев и имеют гидрогенную природу, связанную со сносом с гранитов обрамления впадин, расположенных в пределах Вознесенского террейна.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-17-00004).

Литература

1. Арбузов С. И., Кикина Е. В., Чекрыжов И. Ю., Блохин М. Г., Иванов В. В., Зарубина Н. В., Юйчжуан Сунь, Цуньлян Чжао. Вулканогенный пирокластический материал – источник редких металлов в углях Возновского буроугольного месторождения, Приморский край, Россия // Материалы Всероссийской конференции «Комплексное использование потенциала каменных и бурых углей и создание комбинированных экологически безопасных технологий их освоения» 20–22 сентября 2017 г. – Благовещенск, 2017. – С. 95–99.
2. Арбузов С. И., Рихванов Л. П. Геохимия радиоактивных элементов: учебное пособие, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 4-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – 341 с.
3. Арбузов С. И., Чекрыжов И. Ю., Ильенок С. С., Соктоев Б. Р., Соболева Е. Е. Новые данные по геохимии и условиям образования германий-угольного месторождения Спецугли (Приморский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. – Т. 332. – № 5. – С. 17–38.
4. Вялов В. И., Наставкин А. В., Шишов Е. П. Особенности распределения сопутствующих германию промышленно ценных микроэлементов в углях Павловского месторождения (участок «Спецугли») // Химия твердого топлива. – 1. – № 1. – С. 17–28.
5. Коковкин А. А. Эндогенные уран-полиэлементные рудообразующие системы рифтогенных структурах юга Дальнего Востока России // Отечественная геология, 2006. – № 2. – С. 5–12.
6. Костин Ю. П., Мейтов Е. С. К генезису месторождений высокогерманиеносных углей и критериям их поисков // Известия АН СССР. Серия геологическая, 1972. – № 1. – С. 112–119.
7. Седых А. К. Кайнозойские рифтогенные впадины Приморья. – Владивосток Дальнаука, 2008. – 248 с.
8. Середин В. В. Металлоносность углей: условия формирования и перспективы освоения // Угольная база России. Т. VI. – М.: Геоинформмарк, 2004. – С. 453–519.
9. Середин В. В., Чекрыжов И. Ю. Рудоносность Ванчинского грабена (Приморье) // Геология рудных месторождений, 2011.– Т. 53. – № 3. – С. 230–249.
10. Ханчук А. И., Раткин В. В., Рязанцева М. Д., Голозубов В. В., Гонохова Н. Г. Геология и полезные ископаемые Приморского края. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 82 с.
11. Чекрыжов И. Ю., Середин В. В., Арбузов С. И. Редкоземельные элементы и уран в углях Раковской впадины, Южного Приморья // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Материалы V международной конференции, г. Томск, 13–16 сентября 2016 г. – С. 703–706.

РАДИОАКТИВНОСТЬ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И ЕЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Н. Ф. Чистякова, М. Д. Субботин

Тюменский государственный университет, Институт наук о Земле
Тюмень, Россия, n.f.chistyakova@utmn.ru

RADIOACTIVITY OF THE BAZHENOV FORMATION OF WESTERN SIBERIA AND ITS DEFORMATION AND STRENGTH CHARACTERISTICS

N. F. Chistyakova, M. D. Subbotin

Tyumen State University, Institute of Earth Sciences
Tyumen, Russia, n.f.chistyakova@utmn.ru

The laboratory analysis of the deformation-strength characteristics, lithological composition and content of dispersed organic matter of 35 samples of highly bituminous sediments of the Bazhenov Formation of the Central oil and gas bearing Oblast allowed us to confirm the polymineral composition of clay-silicon-carbonate rocks and identified 3 corresponding lithological types, each characterized by specific values of the studied parameters. It is set that an increase in the content of dispersed organic matter in rocks is accompanied by a decrease in the tensile strength of these types of rocks. The first cracks are formed in the carbonate-siliceous-clay type of rocks at a pressure of 66.9 MPa, then in a siliceous-carbonate-clay type at a pressure of 67.4 MPa and then in a siliceous-clayey-carbonate type - at a pressure of 71.6 MPa.

Введение

Впервые возможную нефтеносность глинистых отложений верхне-юрско – нижне-берриасских отложений баженовской свиты оценил Ф. Г. Гурари в 1959 г. Первые промышленные притоки нефти были получены из отложений баженовской свиты в 1967 г. из коллектора, представленного микрослоистыми листоватыми аргиллитами с межслоевой пустотностью и высоким содержанием рассеянного органического вещества в скв. 15 – Р Салымского нефтяного месторождения. По данным US EIA (2013 г.) суммарные запасы нефти, приуроченной к трещинным коллекторам вторичного происхождения баженовской свиты, составляют 1,2 трлн. Баррелей, а РОСНЕФТЬ (2013 г.) оценила извлекаемые запасы нефти в 22 млрд. баррелей. До настоящего времени вопрос формирования вторичных коллекторов в высокобитуминозных терригенно-карбонатных отложениях баженовской свиты остается дискуссионным.

Проведенное авторами данной работы лабораторное изучение деформационно-прочностных характеристик полиминеральных по литологическому составу пород позволяет обосновать стадийность образования трещин в этих породах. В качестве динамических модулей, характеризующих трещинообрахзование в высокобитуминозных полиминеральных породах баженовской свиты, из которых по геологическим и фациально-литологическим особенностям осадконакопления невозможен равномерный отток углеводородных флюидов, новообразованных на стадии катагенеза, в работе изучались модуль Юнга и коэффициент Пуассона, одновременное и согласованное снижение которых подтверждает уменьшение сопротивления породы к воздействию внешних нагрузок, сопровождающееся образованием в них трещин. По мере накопления фактического материала был установлен полиминеральный состав отложений баженовской свиты, представленный глинисто-кремнисто-карбонатными разностями и выявлены их соответствующие литологические типы.

Материалы и методы

В данной работе исследовался керн 35 образцов баженовской свиты Среднего Приобья, отобранный из 10 скважин в интервале глубин 2831–3145 м, который подвергался в лабораторных условиях воздействию давлений: 66,4; 66,8; 66,9; 67,4; 68,3; 69; 70,6: 71,6 и 73,9 МПа (при пластовом давлении 30–31,4 МПа) и температур 99 °С. С целью изучения механических и петрофизических свойств пород в условиях, приближенных к пластовым, использовалась многофункциональная система для выполнения стационарных и нестационарных тестов, соответствующая техническим требованиям и условиям Российских стандартов и стандартов Международного общества механики горных пород для трёхосевых испытаний образцов горных пород [ГОСТ 26450. 1-85, ГОСТ 21153. 8-88]. Установка содержит камеру для исследования прочностных свойств керна в пластовых условиях, которая позволяет создавать трёхосевое сжатие керна с измерением деформаций (упругих модулей) керна прямым методом до разрушения горной породы вертикальной нагрузкой. Установка дополнительно укомплектована модулем для оценки изменения механических свойств, проницаемости, сжимаемости образцов керна; ультразвуковой

системой измерения скорости продольных (P) и поперечных (S) волн в образцах горной породы при одновременном определении механических свойств статическим и динамическим методами. В исследуемых образцах были определены 14 химических элементов и 10 окислов металлов (рентгенофазовый анализ), слагающих минеральный скелет горной породы; содержание рассеянного органического вещества; механические свойства; петрофизические характеристики – пористость, плотность (объемная, минеральная). Основой для выводов о деформационно-прочностных характеристиках полиминеральных горных пород баженовской свиты послужили результаты анализа параллельных прослоев с изотропными свойствами горных пород.

Результаты и их обсуждение

Условиям накопления осадков, состава палеобиоты, строения, нефтеносности, типов коллекторов, свойств нефтей баженовской свиты посвящен ряд работ крупных ученых и специалистов геологов и геохимиков: А. И. Дмитриевского, Т. Т. Клубовой, Л. П. Климушиной, Н. А. Крылова, Л. В. Ровниной, О. К. Баженовой, И. И. Нестерова, А. Э. Конторовича, О. А. Стасовой, Н. Зимина, Н. И. Плуман, Н. П. Запивалова, Л. П. Рихванова и многих других.

К особенностям условий осадконакопления терригенно-карбонатных высокобитуминозных отложений баженовской свиты относят характер и условия поступления осадочного материала из областей питания, малую скорость уплотнения диатомовых кремнистых илов по сравнению с глинистыми илами, выраженную поликомпонентность литологического состава отложений баженовской свиты, которые обусловили ее различную продуктивность и способность выступать в роли нефтегазоматеринской и нефтегазосодержащей породы одновременно [1]. Баженовская свита залегает в интервале глубин 2500–3000 м; распространена на площади свыше 1 млн. кв. км. Отложения баженовской свиты представлены аргиллитами, радиоляритами и известняками [1]. По данным гамма-спектрометрии скважин на отдельных площадях установлена аномальная радиоактивность отложений баженовской свиты за счет высокого содержания урана [3]. Высокий нефтематеринский потенциал баженовской свиты обусловлен аномально высоким содержанием рассеянного органического вещества, на порядок и более превосходящим его содержание в других нефтематеринских породах юрско-меловых отложений Западной Сибири. Тип рассеянного органического вещества преимущественно сапропелевый, стадия катагенеза МК 2–3. Радиоактивность полиминеральных отложений баженовской свиты обусловлена содержанием рассеянного органического вещества, накапливавшегося на стадии седиментогенеза. Толщина отложений баженовской свиты изменяется от 10 м в западных краевых частях плиты до 60 м – в депоцентре Западно-Сибирского бассейна осадконакопления. Пластовая температура в толще отложений колеблется в пределах +80 – +134 °С; пластовое давление – от гидростатического до аномально высокого. Большинство исследователей полагают, что вторичные коллекторы в баженовской свите, не имеющие жесткого скелета, формировались в интервалах главной фазы нефтеобразования в ходе которой интенсивность генерации углеводородов обуславливает ряд взаимосвязанных процессов: высвобождение пространства за счет расходования рассеянного органического вещества при переходе его в углеводороды; возникновение в очаге генерации углеводородов повышенных давлений; образование микротрещин, что и приводит к формированию вторичного трещинного коллектора [7].

Анализ распределения величин общей радиоактивности по площади баженовской свиты показывает, что радиоактивность затухает с запада на восток (> 100 мкР/час до 40–5 – мкР/час соответственно). Средневзвешенное содержание урана и тория в баженовской свите составляет 38 г/т и 6г/т соответственно. Общие ресурсы урана в толще баженовской свиты колоссальны и оцеваются от 1 до 3 млрд. тонн [4].

Среди изученных авторами образцов баженовской свиты максимальной радиоактивностью характеризуются карбонатно-кремнисто-глинистые прослои, в которых величина давления, приводящего к появлению первых трещин, самая низкая и составляет 66,9 МПа. В породах кремнисто-карбонатно-глинистого типа величина критического давления, при котором образуются трещины, составляет 67,4 МПа. Самые высокие величины давлений, приводящие к образованию трещин, зафиксированы в кремнисто-глинисто-карбонатных прослоях и составляют 71,7 МПа. Аномально повышенная радиоактивность терригенно-карбонатных отложений баженовской свиты связана с карбонатными включениями и прослоями; радиоактивность глинистых прослоев ниже. Наибольшее изменение деформационно-прочностных характеристик с образованием трещин испытывают высокобитуминозные карбонатно-кремнисто-глинистые прослои, обладающие аномально высокой радиоактивностью. затем следуют прослои кремнисто-карбонатно-глинистого состава и наименьшее – прослои кремнисто-глинисто-карбонатного литологического состава. В результате формирования высоких температур, сопровождающих радиоактивный распад урана и др. радиоакттивных элементов, к которым добавляются температуры, выделяемые при катагенетическом преобразовании керогена с образованием жидких, газообразных и твердых углеводородов – компонентов будущих нефтей, конденсатов и горючих газов, в карбонатно кремнисто-глинистых прослоях, входящих в состав пород баженовской свиты, расширение твердой фазы пород превышает их прочностную характери-

стику. Различная прочностная характеристика карбонатов, кремнистых и глинистых пород, влияет на последовательное растрескивание горных пород различного литологического состава. По данным работы [2] тепловое воздействие с нагревом образцов баженовской свиты до температур начала пиролиза органического вещества привело «… возможно к необратимому тепловому расширению образцов за счет растрескивания минерального скелета и поведения геополимеров…». Наибольшее увеличение открытой пористости (Глотов и др., 2019) отмечается для пород, содержащих кальцит и доломит, т. к. именно для карбонатных минералов характерно резко ассиметричное разуплотнение по осям кристалла при нагревании, способствующее дополнительному разуплотнению породы и увеличению ее открытой пористости.

Заключение

1. Тонкозернистые, полиминеральные, высокобитуминозные породы баженовской свиты в природных условиях способны стать вторичным коллектором в результате масштабного трещинообразования на МК 1-2 градациях катагенеза.

2. Повышенная радиоактивностью отложений баженовской свиты, прежде всего, обусловлена радиоактивным излучением урана и продуктов его распада, а также калия и тория [5, 6]. Интегральный показатель образования вторичного коллектора в породах баженовской свиты должен учитывать совокупность следующих факторов: литологический состав горной породы, содержание в ней РОВ, степень его катагенеза и интенсивность генерации углеводородов, отсутствие поблизости пластов-коллекторов, способных обеспечить вторичную миграцию новообразованных углеводородных флюидов. Для образования трещин благоприятно сочетание следующих факторов: а) особенности литологического состава пород – чем больше содержание карбонатов, тем меньше значение критического давления, при котором образуются трещины в породах баженовской свиты, предел прочности горных пород при объемном сжатии и больше значение модуля деформации горной породы; б) содержание РОВ – источника углеводородов на стадии катагенеза: чем выше содержание РОВ, тем меньше значение предела прочности породы при объемном сжатии.

3. В качестве динамических модулей, характеризующих трещинообразование в высокобитуминозных полиминеральных породах баженовской свиты, из которых в силу геологических и фациально-литологических особенностей осадконакопления невозможен равномерный отток углеводородных флюидов, новообразованных на стадии катагенеза, можно использовать модуль Юнга и коэффициент Пуассона, одновременное и согласованное снижение которых подтверждает уменьшение сопротивления породы к воздействию внешних нагрузок, сопровождающееся образованием в ней трещин.

4. Установлены значения критического давления, воздействующего на горные породы различного литотипа, при котором в них образуются трещины: 66,9 МПа в породах карбонатно-кремнисто-глинистого типа; 67,4 МПа – кремнисто-карбонатно-глинистого типа, и 71,6 МПа – кремнисто-глинисто-карбонатного типа.

5. В условиях лабораторного эксперимента наибольшее изменение деформационно-прочностных характеристик с образованием трещин испытывают высокобитуминозные карбонатно-кремнисто-глинистые породы, содержащие 55,5 % карбонатов и 19,1 % РОВ, затем породы кремнисто-карбонатно-глинистого типа с содержанием карбонатов 22,3 % и 12,5 % РОВ, наименьшее – породы кремнисто- глинисто-карбонатного типа с минимальным содержанием карбонатов (5,9 %), РОВ (7,1 %) и максимальным содержанием кремния (81 %).

Литература

1. Геология нефти и газа Западной Сибири. / Авт.: А. Э. Конторович, И. И. Нестеров, Ф. К. Салманов, В. С. Сурков, А. А. Трофимук, Ю. Г. Эрвье. – М.: Недра, 1975. – 680 с.
2. Глотов А. В., Михайлов Н. Н., Молоков П. Б., Парнасов С. В., Штырляева А. А. Оценка влияния теплового воздействия на структуру порового пространства при определении емкостных свойств баженовской свиты с использованием синхронного термического анализа // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – М. «ВНИИОЭНГ», 2019. – № 1. – С. 37–43.
3. Зимин Ю. Н., Замирайлова Е. Г., Эдер В. Г., Уран, торий и калий в черных сланцах баженовской свиты Западно-Сибирского морского бассейна // Литология и полезные ископаемые, 2016. – № 1. – С. 82–94.
4. Нестеров И. И. Битуминозные глинистые и кремнисто-глинистые породы – новый глобальный источник топливно-энергетического сырья // Нефть и газ, 2011. – № 6. – С. 7–32.
5. Плуман Н. И., Урановосность черных битуминозных аргиллитов верхней юры Западно-Сибирской плиты // Геохимия, 1971. – № 11. – С. 1362–1368.
6. Рихванов Л. П., Усольцев Д. Г., Ильенок С. С., Ежова А. А. Минералого-геохимические особенности баженовской свиты Западной Сибири по данным ядерно-физических и электронно-ми-

кроскопических методов исследования // Известия Томского политехнического университета, 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 50–63.

7. Строение и нефтегазоносность баженитов Западной Сибири / под ред. И. И. Нестерова / Тюмень, ЗапСибНИГНИ, 1985. – 176 с.

ПОДВИЖНОСТЬ ^{137}Cs В АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ РЕКИ ЕНИСЕЙ (БЛИЖНЯЯ ЗОНА ВЛИЯНИЯ КРАСНОЯРСКОГО ГХК)

А. В. Чугуевский, М. С. Мельгунов, И. В. Макарова

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН
Новосибирск, Россия, chuguevsky@igm.nsc.ru

MOBILITY OF ^{137}Cs IN ALLUVIAL SEDIMENTS OF THE YENISEI RIVER (NEAR ZONE OF INFLUENCE OF THE KRASNOYARSK MCC)

A. V. Chuguevsky, M. S. Melgunov, I. V. Makarova

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
Novosibirsk, Russia,chuguevsky@igm.nsc.ru

The nature of ^{137}Cs distribution in vertical columns of bottom sediments of the Yenisei River sampled in the near zone of influence of the Krasnoyarsk Mining and Chemical Combine was revealed. The mineral composition of the bottom sediments has been determined. A comparison is made of the migration capacity of ^{137}Cs accumulated in dispersed form as a result of radioactive waste dumping from the territory of the MCC and in alluvial sediments contaminated during the dissolution of "hot" particles. It is shown that in the first case, in mobile forms, which in natural conditions can pass into an aqueous solution, there is, on average, 20–22 % ^{137}Cs. The proportion of mobile forms of ^{137}Cs in alluvium contaminated with the dissolution of "hot" particles is 40–45 %.

Введение

В течение более 30 лет Красноярский горно-химический комбинат был источником радиоактивного загрязнения поймы реки Енисей такими долгоживущими техногенными радионуклидами (ТРН), как ^{152}Eu, ^{154}Eu, ^{155}Eu, ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{241}Am, ^{90}Sr и изотопы плутония [11, 7, 9, 10, 12, 14]. ^{137}Cs и ^{90}Sr фиксируются в донных отложениях вплоть до Карского моря [5, 24]. Особенно сильному загрязнению подверглась ближняя зона влияния ГХК. Ближняя зона влияния выделяется достаточно условно (по фиксированию в воде короткоживущих ТРН) и представляет собой участок поймы протяженностью ≈ 18 км от места сброса ГХК (60–78 км вниз по течению от г. Красноярска) до Балчуговской протоки.

Сброс радиоактивных отходов в последние полтора десятилетия существенно (в сотни – тысячи раз) сократился. Теперь основными источниками загрязнения экосистемы реки Енисей являются отстойники, расположенные на территории комбината, и аллювиальные отложения поймы (особенно в ближней зоне влияния ГХК), в которых уже накоплены значительные количества ТРН.

Пристальное внимание определению форм нахождения техногенных радионуклидов, депонированных в аллювиальных отложениях, и изучению их вторичного перераспределения начинает уделяться с начала 2000-х гг. Было проведено опробование несколько участков поймы на островах и правом берегу реки. В работах [11, 17, 18, 19, 20, 22] предложены различные методики проведения химического фракционирования для определения форм нахождения ТРН (^{152}Eu, ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{241}Am, ^{90}Sr, ^{239,240}Pu) в аллювиальных почвах и донных отложениях.Сделан вывод о том, что сорбция радионуклидов на переносимых рекой взвесях и ранее отложившихся частицах в верхних слоях осадков и механический их перенос – это доминирующий фактор миграции и накопления радиоизотопов в донных отложениях [5, 9, 10].

Показано, что большая часть ТРН приурочена к неподвижным и слабо-подвижным формам нахождения, что препятствует их переходу в водные растворы. Вместе с тем, в работе [18] сделан вывод о том, что при изменении физико-химических условий, например, в процессе гумификации, подвижные формы радионуклидов переходят в неподвижные. В других случаях, неподвижные формы могут трансформироваться в подвижные, и становиться источником вторичного загрязнения радионуклидами поймы р. Енисей.

Специфической формой нахождения ТРН в ближней зоне влияния Красноярского ГХК являются «горячие» частицы (ГЧ). К «горячим» частицам относят «… частицы, имеющие микрометровые и субмикрометровые размеры, обладающие на несколько порядков большей активностью, чем средняя активность почвы тех же размеров» [4]. По определению

МАГАТЭ [23] радиоактивные частицы в окружающей среде определяются как локализованные агрегаты радиоактивных атомов, которые дают повышение неоднородности распределения радионуклидов существенно отличную от таковой в фоновой матрице. Как правило, к частицам относят образования, превышающие по размерам 0,45 мкм [23]. История изучения «горячих» частиц, связанных с радиоактивным загрязнением поймы реки Енисей, насчитывает более 25 лет. С 1994 года различными исследователями [1, 2, 6, 13, 15, 16] было обнаружено и изучено несколько сотен «горячих» частиц. По составу гамма-излучающих радионуклидов все ГЧ, данные по которым приведены в указанных работах можно условно разбить на три группы: моноизотопные – содержат только ^{137}Cs с активностью до $2 \cdot 10^6$ Бк на частицу; двухизотопные, содержащие ^{137}Cs и ^{134}Cs с активностями в диапазоне $2{,}7 \cdot 10^4 – 30 \cdot 10^6$ Бк и 10–7500 Бк соответственно; полиизотопные – ^{137}Cs ($4 \cdot 10^4 – 7 \cdot 10^5$ Бк), ^{134}Cs (180–1250 Бк), ^{154}Eu (1000–5000 Бк), ^{155}Eu (300–1400 Бк), ^{60}Co (20–30 Бк), ^{241}Am (20–75 Бк). Следует отметить доминирующую роль ^{137}Cs.

В работах [2, 13] описаны лабораторные и натурные эксперименты по растворению «горячих»частиц. Показано, что, находясь в естественных условиях залегания в затопляемых почвах пойменной части р. Енисей, ГЧ под действием фильтрующейся воды и влаги поровых растворов постепенно растворяются, а входящий в их состав ^{137}Cs вовлекается в повторную миграцию.

Целью данной работы является сравнение возможности растворения в водном потокеи вовлечения во вторичную миграцию ^{137}Cs, депонированного в рассеянной форме в донных осадках р. Енисей, и ^{137}Cs, поступившегов аллювиальные отложения в результате растворения «горячих»частиц.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования была выбрана коса Атамановская (в данный момент это остров), расположенная в 5 км вниз по течению от места сброса, отделенная от правого берега протокой шириной около 30 м. В сентябре 2003 года в протоке, напротив центральной части косы, были отобраны три колонки донных отложений (Е02-1, Е02-2 и Е03). При отборе проб использовался цилиндрический пробоотборник с вакуумным затвором диаметром 84 мм и длиной 50 см, позволяющий извлекать илистые сильнообводненные и песчанистые осадки. Полученный керн разделялся перпендикулярно оси на слои по 1 см. В лабораторных условиях пробы донных отложений доводились до воздушно-сухого состояния, тщательно перемешивались и взвешивались после чего анализировались на содержание техногенных радионуклидов.

Определение изотопного состава и активности гамма-излучающих радионуклидов выполнялось гамма-спектрометрическим методом на коаксиальном Ge (Li) ППД ДГДК-100В (производство ИФТП, г. Дубна, с относительной эффективностью регистрации 10 % и разрешением по линии 1332,5 кэВ – 2,6 кэВ), периферийного спектрометрического оборудования, многоканального анализатора АЦП-8К-2 в составе ПК IBM PC и программного комплекса ANGAMMA фирмы «АСПЕКТ» (г. Дубна).

Минеральный состав донных отложений исследован рентгенофазовым анализом (метод порошковой дифрактометрии) на дифрактометре ДРОН-4, режим съемки 40 кВ, 24 мА, медное излучение (Cu-α).

С целью изучения распределения ТРН между компонентами поглощающего комплекса донных отложений был проведен эксперимент по фракционному разделению радионуклидов по методике Tessier [23], адаптированной Бондаревой Л. Н. с соавторами для искусственных радионуклидов в донных отложений реки Енисей [3]. Фракционирование проводилось при соотношении образец : раствор = 1 : 10. Все жидкие фракции отфильтровывались через фильтр «синяя лента». Перед каждым следующим реагентом донные отложения дважды промывались дистиллированной водой при перемешивании и в стакане, и на фильтре. С фильтра донные отложения смывались следующим раствором реагента. Полученные растворы, твердые остатки, а также исходный материал анализировались на гамма-спектрометре.

Определение минерального состава донных отложений, измерения активности гамма-излучающих ТРН и фракционное разделение радионуклидов выполнялись в Центре коллективного пользования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований Института геологии и минералогии СО РАН (ЦКП МИИ СО РАН).

Результаты и их обсуждение

Рентгенофазовым анализом некоторых слоев разреза из колонок Е02-1 и Е02-2 было установлено, что минеральный состав отложений одинаков в обеих колонках и не меняется с глубиной. Основными минералами, слагающими донные отложения, являются кварц, плагиоклаз, калиевый полевой шпат. Содержатся небольшие количества амфибола, хлорита, слюды. Минеральный состав колонок близок к составу аллювиальных отложений (почв и донных осадков), изученных ранее [8, 11, 20, 21], и является типичным для ближней зоны влияния Красноярского ГХК.

На рис. 1. показано вертикальное распределение ^{137}Cs в колонках донных отложений, отобранных в протоке между косой Атамановской и правым берегом реки Енисей.

Присутствие ^{137}Cs отмечается по всему разрезу во всех трех колонках. Средняя его концентрация

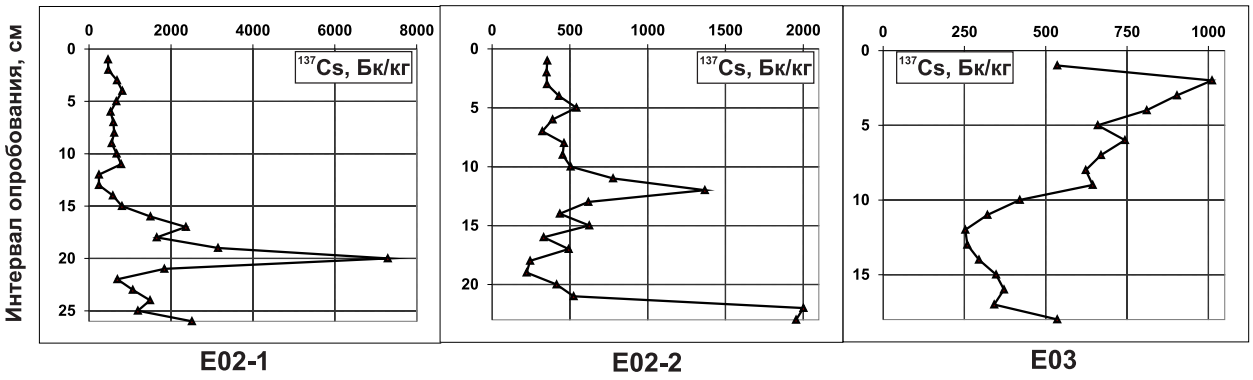


Рис. 1. Вертикальное распределение ^{137}Cs в донных отложениях, отобранных в районе косы Атамановской (колонки E02-1, E02-и E03, удельные активности на 2003 г.)

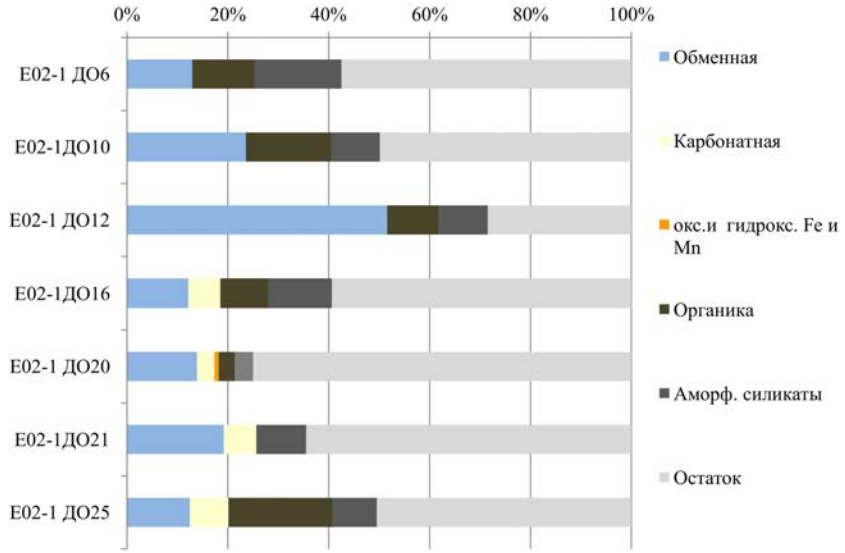


Рис. 2. Результаты фракционного разделения ^{137}Cs (колонка E02-1, коса Атамановская)

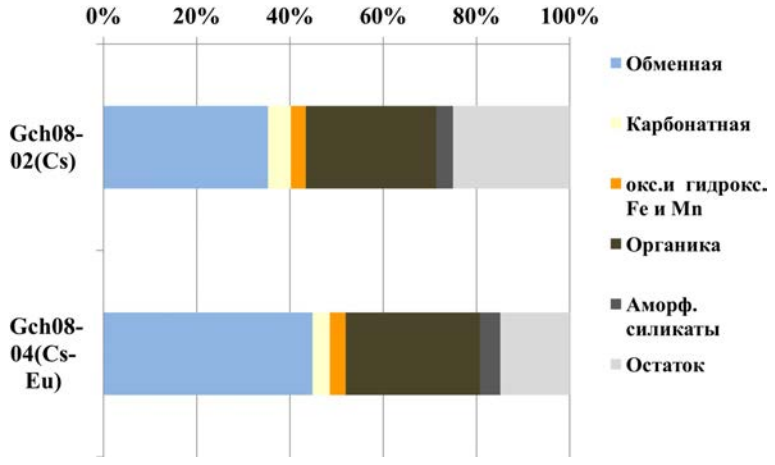


Рис. 3. Результаты эксперимента по фракционному разделению ^{137}Cs в аллювиальных отложениях, загрязненных в ходе эксперимента по растворению «горячих» частиц

составляет 810 Бк/кг, при максимальном значении 7300 Бк/кг в пробе Е02-1ДО20. Наблюдаемая неравномерность распределения ^{137}Cs иналичие ярко выраженных максимумов (слои Е02-1ДО20, Е02-2ДО12, Е02-2ДО22, Е03ДО3) скорее всего связаны с широким распространением в аллювиальных отложениях ближней зоны влияния ГХК тонкодисперсных активных частиц различной природы [6, 11, 15, 16]. Кроме ^{137}Cs в донных отложениях зафиксированы изотопы европия – ^{152}Eu, ^{154}Eu и ^{155}Eu. (средняя активность на время опробования составляла 1800, 410 и 75 Бк/кг соответственно) и ^{60}Co – в среднем 570 Бк/кг.

Подвижность техногенных радионуклидов, депонированных в донных отложениях и аллювиальных почвах, определяется прочностью их фиксации компонентами поглощающего комплекса. Для определения форм нахождения ^{137}Cs в донных отложениях косы Атамановской был проведен эксперимент по фракционному разделению. Для этого были отобраны 7 образцов из колонки Е02-1, взятых с разных глубин. Результат экспериментапредставлен на рис. 2.

Количество обменной фракции ^{137}Cs примерно одинаково для шести образцов (колеблется в пределах 14–21 %), и лишь в одном случае (горизонт Е02-1ДО12) достигает 51,7 %. Доля карбонатной фракции ^{137}Cs, выявленной в средней и нижней частях колонки, составляет в среднем 6,9 % (3,5–7,6 %). Наличие ^{137}Cs в оксидах и гидроксидах Fe и Mn установлено только в одном образце в количестве 0,8 %. С органической фракцией связано 11,5 % (от 3,2 до 20,7 %) ^{137}Cs. С нерастворимыми аморфными силикатами – 10 % (8–12 %). В твердом остатке содержится основная часть ^{137}Cs – 56 % в среднем (28,5–75 %).

На основании полученных в результате эксперимента по фракционному разделению данных можно сделать выводы о возможности выноса ^{137}Cs из донных отложений косы Атамановской. Согласно работе [3] к подвижным формам относятся обменная, карбонатная форма и оксиды и гидроксиды Fe и Mn. К слабо-подвижным – связанные с органикой и аморфные силикаты. Вместе с тем принято считать, что оксиды и гидроксиды железа и марганца становятся подвижными только в восстановительных условиях, а в рассматриваемом случае условия окислительные. Поэтому в данной работе к подвижным формам отнесены обменная и карбонатная фракции, условно-подвижным – три остальные.Таким образом, в донных отложениях косы Атамановской в подвижных формах содержится 22 % ^{137}Cs.

В 2008.году был проведен лабораторный эксперимент по растворению «горячих» частиц [3, 13]. Две ГЧ, моно-цезиевая (Gch08-02) и полиизотопная (Gch08-04), помещались в колонки, заполненные образцами типичных енисейских аллювиальных почв, отобранных в фоновых районах. Подготовленные колонки подвергались воздействию дистиллированной водой в слабопроточном режиме. В результате эксперимента в обеих колонках сформировался слой, загрязненный ^{137}Cs. Для выявления форм нахождения ^{137}Cs во вновь сформированном в ходе эксперимента загрязненном материале было проведено фракционное разделение по описанной выше методике. Его результаты представлены на рис. 3.

Значительная часть ^{137}Cs (35 и 45 % для моноцезиевой и полиизотопной частиц соответственно) находится в обменной фракции, что согласуется с его высокой подвижностью, проявленной в ходе эксперимента, и значительно превышает значения, полученные для донных отложений (рис. 2). Около 5 %, ^{137}Cs в обоих случаях находится в подвижной форме, связанной с карбонатами. Доля, ^{137}Cs, содержащегося в твердом остатке составляет 25 % для моно-цезиевой и 15 % для полиизотопной частиц, что также существенно отличается от количества ^{137}Cs, связанного с твердым остатком в донных отложениях.

Заключение

В ходе лабораторного эксперимента по фракционному разделению установлено, что в естественных условиях около 22 % ^{137}Cs депонированного в рассеянной форме в донных отложениях р. Енисей может вовлекаться во вторичную миграцию в растворенном виде. Перенос остальной части ^{137}Cs, при отсутствии катастрофических изменений физико-химических условий в речной экосистеме, происходит в сорбированном состоянии в составе взвесей.Фракционное разделение ^{137}Cs, поступившего в аллювиальные отложения в результате растворения «горячих» частиц, показало, что в подвижных формах (по крайней мере на начальной стадии, пока не произошел переход в сорбированное состояние за счет процессов включения ^{137}Cs в кристаллическую решетку минералов аллювия), содержится значительно большая часть ^{137}Cs – 40–50 %, в зависимости от типа растворившейся ГЧ.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Аналитическая работа выполнена в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

Литература

1. Болсуновский А. Я. Горячие частицы в Красноярском крае / Болсуновский А. Я., Горяченкова Т. А., Черкезян В. О., Мясоедов Б. Ф. // Радиохимия, 1998. – Т. 40. – № 3. – С. 271–274.

2. Болсуновский А. Я. Радиоактивные частицы в бассейне реки Енисей / Болсуновский А. Я., Дементьев Д. В., Зотина Т. А., Мельгунов М. С., Чугуевский А. В. // Материалы V Международной

конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». – Томск, 2016. – С. 133–135.
3. Бондарева Л. Г. Оценка миграционной способности трансурановых радионуклидов (^{241}Am, изотопов плутония) и ^{152}Eu в донных отложениях реки Енисей / Бондарева Л. Г., Болсуновский А. Я., Сухоруков Ф. В., Казбанов В. И., Макарова И. В., Леглер Е. В. // Радиохимия, 2005. – Т. 47. – № 4. – С. 289–294.
4. Быховский А. В. Горячие аэрозольные частицы при техническом использовании атомной энергии / Быховский А. В., Зараев О. М. – Москва, Атомиздат, 1974. – 254 с.
5. Вакуловский С. М. Перенос радионуклидов в р. Енисей / Вакуловский С. М., Тертышник Э. Г., Кабанов А. И.// Атомная энергия, 2008. – Т. 105. – № 5. – С. 285–291.
6. Гритченко З. Г. «Горячие» частицы 2-го рода в пойменных почвах реки Енисей / Гритченко З. Г., Кузнецов Ю. В., Легин В. К., Струков В. Н., Мясоедов Б. Ф., Новиков А. П., Шишлов А. Е., Савицкий Ю. В. // Радиохимия, 2001. – Т. 43. – № 6. – С. 563-565
7. Кузнецов Ю. В. К оценке вклада реки Енисей в общую радиоактивную загрязненность Карского моря / Кузнецов Ю. В., Ревенко Ю. А., Легин В. К., Раков Н. А., Жидков В. В., Савицкий Ю. В., Тишков В. П., Поспелов Ю. Н., Егоров Ю. М. // Радиохимия, 1994. – Т. 36. – Вып. 6. – С. 546–559.
8. Линник В. Г. Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов. / Линник В. Г. – М.: Изд-во РАН, 2018. – 372 с.
9. Носов А. В. Анализ радиационной обстановки на р. Енисее после снятия с эксплуатации прямоточных реакторов Красноярского ГХК / Носов А. В., Мартынова А. М. // Атомная энергия, 1996. – Т. 81. – Вып. 3. – С. 226–232.
10. Носов А. В. Исследование механизмов миграции радиоактивных веществ в пойме Енисея / Носов А. В. // Метеорология и гидрология, 1997. – № 12. – С. 84–91.
11. Сухоруков Ф. В. Закономерностираспределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей / Сухоруков Ф. В., Дегерменджи Ф. В., Белолипецкий В. М., Болсуновский А. Я., Ковалев С. И., Косолапова Л. Г., Мельгунов М. С., Рапута В. Ф.; Науч. редакторы: акад. Ф. В. Шабанов, чл-кор. РАН А. Г. Дегерменджи. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал «Гео», 2004. – 286 с.
12. Тимофеев В. А. Техногенное радиоактивное загрязнение аллювиальных отложений Енисея / Тимофеев В. А. // Сборник докладов II Междунар. радиоэкологической конф. – Красноярск, 1995. – С. 165–171.
13. Чугуевский А. В. Роль «горячих» частиц реки Енисей во вторичном перераспределении техногенных радионуклидов / А. В Чугуевский, М. С. Мельгунов, И. В. Макарова // Экология промышленного производства, 2018. – 4 (104). – С. 7–12.
14. Bolsunovsky A. Radionuclide speciation in sediments of the Yenisei River /Bolsunovsky A. // Radioprotection, 2011. – V. 46. – № 6. – P. 195–198.
15. Bolsunovsky A. Study of sediments and radioactive particles of the Yenisei River using a variety of analytical methods / Bolsunovsky A., Melgunov M. // Journal of Geoscience and Environment Protection, 2014. – № 2 – P. 153–158.
16. Bolsunovsky A., Melgunov M., Chuguevskii A., Lind O. C., Salbu B. Unique diversity of radioactive particles found in the Yenisei river floodplain // Scientific Reports, 2017. – V. 7. – № 1. – P. 11132.
17. Bondareva L. G. Speciation of artificial radionuclides ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{152}Eu, and ^{241}Am in bottom sediments of the Yenisei river / Bondareva L. G., Bolsunovskii A. Ya.// Radiochemistry, 2008. – V. 50. – № 5. – P. 475–480.
18. Bondareva L. The relationship of mineral and geochemical composition to artificial radionuclide partitioning in Yenisei river sediments downstream from mining-and-chemical combine Rosatom / Bondareva L., Artamonova S. // Natural Science, 2011. – V. 3. – № 7. – P. 517–529.
19. Brown J.E. Vertical distribution of anthropogenic radionuclides in cores from contaminated floodplains of the Yenisey River / Brown J. E., Dowdall M., Korobova E. M., Linnik V. G., Volosov A. G., Standring W. J. F // Journal of Environmental Radioactivity, 2009. – № 100. – P. 1109–1120.
20. Korobova E. M. Distribution of artificial radioisotopes in granulometric and organic fractions of alluvial soils downstream from the Krasnoyarsk Mining and Chemical Combine (KMCC), Russia / Korobova E. M., Linnik V. G., Brown J. // Journal of Soils and Sediments, 2016. – V. 16. – № 4. – P. 1279–1287.
21. Korobova E. M. Granulometric and mineralogic investigation for explanation of radionuclide accumulation in different size fractions of the Yenisey floodplain soils / Korobova E. M., Linnik V. G., Chizhikova N. P., Alekseeva T. N., Shkinev V. M., Browne J., Dinua M. I. // Journal of Geochemical Exploration, 2014. – № 142. – P. 49–59.
22. Pavlotskaya F. I. Speciation and Migration Behavior of Pu and Am in Floodplain Soils and Bottom Sediments of the Yenisei River / Pavlotskaya F. I., Goryachenkova T. A., Kazinskaya I. E., Novikov A. P., Myasoedov B. F., Kuznetsov Yu. V., Legin V. K., Shishkunova L. V. // Radiochemistry, 2003. V. 45. – № 5. – P. 524–531.
23. Salbu B. Speciation of radionuclides – analytical challenges within environmental impact risk assessments / Salbu B // Journal of Environmental Radioactivity. – 96 (2007). – P. 47–53.
24. Semizhon T. Transport and distribution of artificial gamma-emitting radionuclides in the River Yenisei

and its sediment / Semizhon T., Rollin S., Spasova Y., Klemt E. // Journal of Environmental Radioactivity, 2010. – № 101. – P. 385–402.

25. Tessier A. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals / Tessier A., Cambell P. G., Bisson M.//Analytical chemistry. – V. 151 (1979). – P. 232–258.

РАДИОАКТИВНЫЕ ПЕСЧАНИКИ В РАЗРЕЗЕ МЕЛА ЛОДОЧНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

М. В. Шалдыбин, Е. Н. Ефимов

АО «ТомскНИПИнефть»
Россия, ShaldybinMV@tomsknipi.ru, EfimovEN@tomsknipi.ru

RADIOACTIVE SANDSTONES IN CRETACEOUS STRATA OF LODOCHNOE OILFIELD

M. V. Shaldybin, E. N. Efimov

JSC TomskNIPIneft
Tomsk, Russia, ShaldybinMV@tomsknipi.ru, EfimovEN@tomsknipi.ru

Sandstones enriched by Th and U have been discovered within one of the layer of the Lodochnoye oilfield in the core of a deep well at the depth of more than 2.5 km. Their contents exceeding the levels of concentration more than 4–5 times and their studies using spectral gamma-ray and observation in thin sections, as well as by XRD methods showed that the rock has enriched by the accessories: pyrite, titanium minerals, thorite, and zircone. The supposed source of the unusual association of sediments is the long stay in marine coastal environments.

Введение

Объектом для исследования послужили песчаные пласты Лодочного месторождения (Западная Сибирь) вскрытые глубокими скважинами на глубинах более 2,5 км. Данные объекты (пласты) в первую очередь рассматриваются как терригенные песчаные коллекторы нефти и газа, географически принадлежащие самым северным территориям Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна – мезо-кайнозойским отложениям Хатангской впадины.

Стандартные геофизические исследования при вскрытии глубокими скважинами для таких пластов предполагают выполнение обязательного комплекса каротажа, одним из которых является гамма (радиоактивный) каротаж. Традиционно, повышенные значения гамма-фона при изучении осадочных последовательностей нефтегазоносных осадочных бассейнов связаны с эффектом высокой или повышенной радиоактивности глинистых и в меньшей степени алевритистых горных породи пониженной радиоактивностью песчаных пород. Однако при изучении керна в лабораторных условиях для разреза одной из скважин Лодочного месторождения на установке гамма спектрометрии EGL-255-A (CoretestSystems, Inc.) нами были выявлены необычные радиоактивные аномалии по гамма-каротажу с высокой концентрацией тория и урана, которые рассматриваются далее.

Материалы и методы

Колонка керна из скважины была изучена на аппаратеспектрального гамма каротажа EGL-255-A (CoretestSystems, Inc.) который позволяет фиксировать естественный радиоактивный фон горных пород. Отдельно аппарат позволяет определять суммарнуюгамма-активность, а также спектр значений для радиоактивных элементов: U, Th и K. В практике АО «ТомскНИПИнефть» полученные данные используются для увязки керна со скважинным каротажем и определением сдвига глубин, а также выявления мест возможного невыноса керна. Детектором гамма-квантов служит сцинтилляционный счетчик, состоящий из искусственно выращенного монокристалла йодистого натрия (NaI) активированного таллием. Плата многоканального анализатора используется для анализа различных уровней гамма-излучений, даже при низких интенсивностях излучения горных пород.

Породы также были изучены в тонких срезах (петрографических шлифах) с использованием микроскопа OlympusBX51 и рентгеновского дифрактометра RigakuUltimaIV. В петрографическом анализе производился стандартныйподсчет обломков по 250 точкам с описанием их текстурно-структурных характеристик, описания обломков, матрикса и цемента песчаных пород. Съемка XRDтонких порошков производилась при следующих параметрах: анод Cu, напряжение 40 кВ, при токе 30 мА, мощности 1,2 кВт и

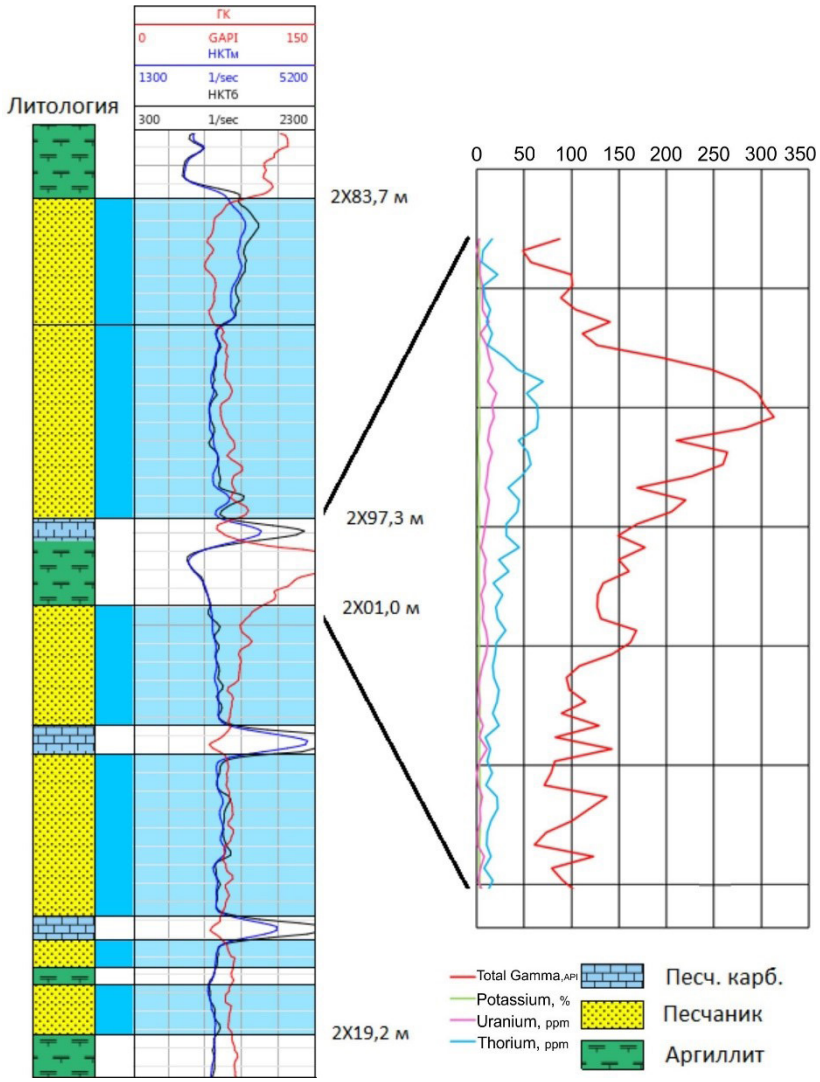


Рис. 1. Колонка керна скважины Лодочного месторождения с повышенной гамма-аномалией и общий фон гамма-активности со спектрами содержаний U, Th и K

скорости съемки – 1 °/мин. Интерпретация дифрактограмм производилась с помощью ПО PDXL, Traces V6, SiroQuant с использованием базы данных картотеки ICDD PDF-2-2003.

Результаты и их обсуждение

Радиоактивный каротаж проведенный по всему стволу скважинывыявил на глубине свыше 2,5 км положительную аномалию мощностью чуть более 4 метров, которая согласно принятым правилам интерпретации ГИС была традиционно отнесена к глинистому пропластку (Рис. 1). Однако при изучении керна на аппарате спектрального гамма каротажа,а также при визуальном осмотре горных пород из керна при литологическом описании выяснилось, что в данном интервале распространены и залегают обычные песчаные породы, но с аномально повышенным гамма-фоном. Среднее содержания тория для песчаного пласта составило ~ 30 г/т (в максимальной точке до 70 г/т) при кларковом значении тория для песчаников – 10 г/т [1]. Среднее содержания урана для этого же пласта составило ~ 9,5 г/т (в максимальной точке до 21 г/т) при кларковом значении урана для песчаников 2 г/т [1]. Содержания калия в свою очередь остаются на кларковом уровне и не находят сколь-нибудь значимых превышений над фоновыми значениями. Таким образом наблюдаемые концентрации Th и U превышают обычные в 4–5 раз.

Изучение данногоинтервала далее было продолжено более тонкими методами.

Петрографически вскрытый объект не является аргиллитом, а относится к песчаному литотипу субаркозовой природы с составом компонентов: обломками и матриксом – 85–88 %, и цементом в количестве до 8–10 %. Цемент представлен глинистыми минералами, из которых более половины – это образования хлорита и в меньшей степени иллита, при незначительной доли каолинита и реже карбонатным цемен-

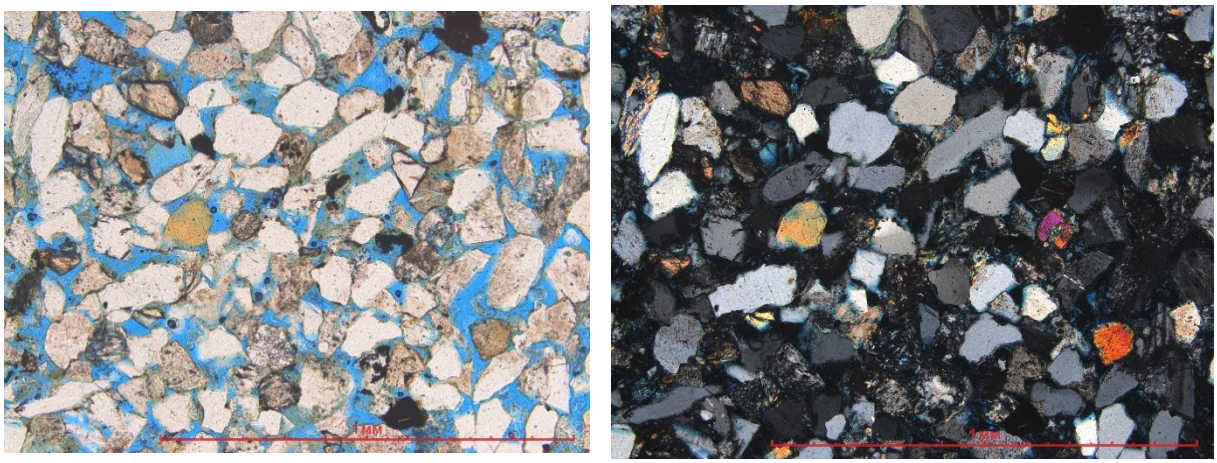


Рис. 2. Фото петрографического шлифа (николи параллельны и скрещены). Песчаник с повышенными содержаниями титанистых акцессориев (цветное). Голубая закраска эпоксидной смолой соответствует поровому пространству

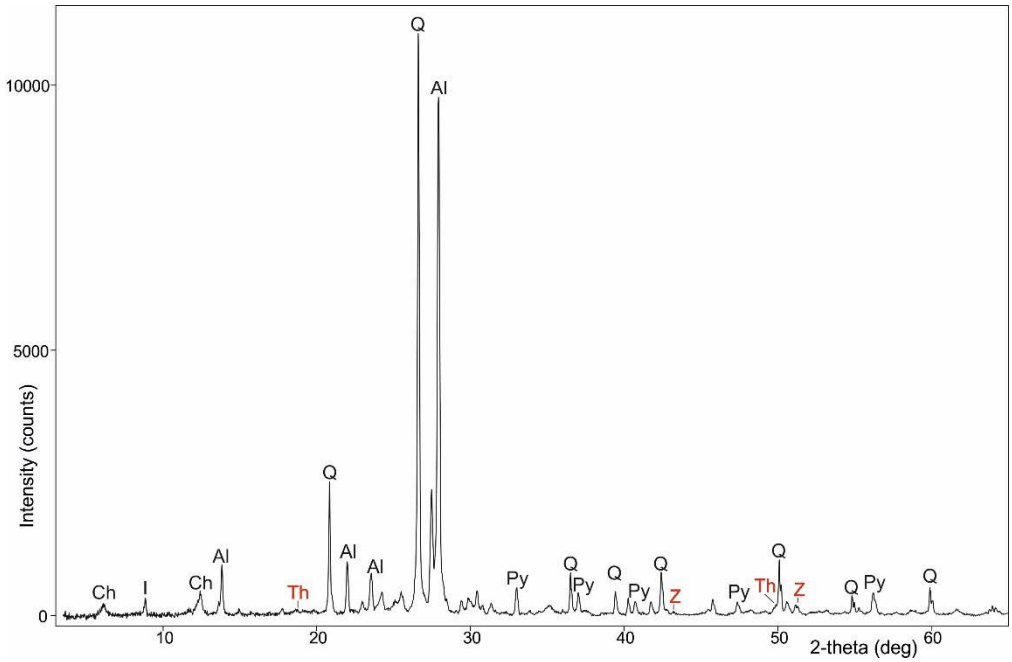


Рис. 3. Рентгенограмма горной породы изученного интервала. Минералы: Q – кварц; Al – альбит; Py – пирит; Ch – хлорит; I – иллит; Z – циркон; Th – торит

том до 2 % (кальцит и сидерит).Песчаники являются неплохими коллекторами с пористостью доходящей до 10–12 %.

Состав обломков следующий: кварц – 35–40 %, полевые шпаты – 32–37 %, обломки пород – 20 %, среди которых встречены кварциты, гранитоиды, кремнисто-слюдистые и углисто-кремнистые обломки, эффузивы, кварц-серицитовые сланцы. При этом среди обломков необычно высокая доля акцессорных минералов,которая по валу может доходить до 2–3 %. Акцессории представлены пиритом, эпидотом, цирконом, рутилом, цоизитом, клиноцоизитом, турмалином, сфеном с послойным и локальным распределением (Рис. 2).

Изучение породы методами рентгеновской дифракциитакже подтверждает песчаную природу изученного объекта с составом: кварц и кварцсодержащие компоненты – 45–50 %, полевые шпаты (плагиоклаз и КПШ) – 40–45 %, при преобладании хлоритового и иллитового цемента (в общем до 10–12 %) при незначительной роли каолинитового (менее 1 %) и карбонатного (менее 2 %) цементов (Рис. 3). Из акцессориев на дифрактограммах явно выделяется пирит (1–3 %), предположительно выделяются пики торита ($ThSiO_4$) и циркона($ZrSiO_4$), что в целом объясняет происхождение аномалии (Рис. 3).

Таким образом,фактически в многометровом песчаном пласте наблюдается локальная зона раз-

вития высокорадиоактивных песчаников (до 4 метров) активность которых обеспечивается наличием обломков с повышенным концентрацией редких титанистых акцессориев, предположительно до 2 % по валовому содержаниюу, создающих высокую гамму активность как на каротажной кривой, так и при лабораторных измерениях гамма-активности.

Заключение

Аномалия исследовалась нами в одной скважине, но была ранее найдена и в других скважинах в пределах развития одновозрастного песчаного горизонта. Это свидетельствует о ее региональном распространении, а масштаб ее проявления зависел от фациальных условий отложения осадков. Природа аномалии и использование далее предполагает коррекцию в распределении литологической последовательности разреза. Происхождение аномалии, в свою очередь, как предполагается был обусловлен необычным привносом радиоактивного песка при морских процессах с условиями многократного их перемывания вблизи берега, как это происходит для современных высокорадиоактивных титанистых морских россыпей, протягивающихся на сотни километров вдоль современных берегов [2]. К ним можно отнести, в частности, широко известные прибрежно-морские россыпи ильменита и рутила восточного побережья Австралии или аналогичные темноцветные пески у западной границы полуострова Индостан (месторождение морских титанисто-редкоземельных песков Траванкор, Индия).

Авторы благодарят сотрудников АО «ТомскНИПИнефть» Черданцеву Д. А., Кондрашову Е. С. и Канаки А. В. за помощь при выполнении исследований.

Литература

1. Reimann C. & Caritat P. de. 1998. Chemical Elements in the Environment. Springer-Verlag. – Berlin. – 398 p.
2. Голубева И. И., Титановые минералы современной прибрежно-морской россыпи О. Страдброук (Вост. Австралия) и Пижемской палеороссыпи Среднего Тимана (Россия) / И. И. Голубева, О. Б. Котова, С. А. Рубцова // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 2013. – № 9 (225). – С. 24–28.

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ УРАНА И ТОРИЯ В НАКИПИ ПИТЬЕВЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ ЮЖНОГО КАЗАХСТАНА

Б. У. Шарипова[1], А. А. Какабаев[1], Н. В. Барановская[2], Г. Е. Байкенова[1]

[1]Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова
Кокшетау, Казахстан, oralovna82@mail.ru, anuarka@mail.ru, guliander@bk.ru
[2]Томский политехнический университет
Томск, Россия, nata@tpu.ru

ASSESSMENT OF THE CONTENT OF URANIUM AND THORIUM IN THE SCALE OF DRINKING WATER IN THE TERRITORY OF SOUTHERN KAZAKHSTAN

B. U. Sharipova[1], A. A. Kakabayev[1], N. V. Baranovskaya[2], G. E. Baikenova[1]

[1]Sh.Ualikhanov Kokshetau University
Kazakhstan, Kokshetau, oralovna82@mail.ru, anuarka@mail.ru, guliander@bk.ru
[2]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, nata@tpu.ru

The article presents the results of a study of radioactive elements (U, Th) in salt formations of drinking water in South Kazakhstan. The topic is relevant for this region since large uranium deposits are located here, which are actively being developed today. As a result of the study, we found that the accumulation of uranium and thorium in the salt formations of drinking water in South Kazakhstan is formed mainly due to the peculiarities of the geological structure of the region under study, the Th/U ratio also confirms this fact. The increased content of thorium in the scale of the village of Saryagash is of interest, since the territory is the center of sanatorium-resort treatment, and requires further more detailed study.

Введение

Наличие и качество подземных и поверхностных вод является одним из основных факторов здоровья населения. Особенно это важно для вод, которые представляют собой питьевое водоснабжение. Состояние подземных и поверхностных вод постоянно подвержено изменениям, на которые влияют, как хозяйственная деятельность человека, так и различные природные факторы [6, 10, 20–22]. Известно, что гидрологический и гидрохимический режим воды обусловлен физико-географическими условиями речного бассейна, а также взаимодействием с горными породами и толщей почв через которую она проходит. Поэтому знания элементного состава воды способствуют использованию ее при поиске месторождений полезных ископаемых [11, 15]

Изучение воды на наличие радиоактивных элементов, таких как торий и уран, является актуальной проблемой для Южного Казахстана, так как здесь располагаются крупные урановые месторождения, активно разрабатываемые на сегодняшний день.

В связи с нарастающим техногенным влиянием на окружающую среду все большее внимание ученых направлено на эколого-геохимическое изучение территорий, подвергающееся изменениям в связи с деятельностью человека. Для оценки состояния окружающей среды используют различные компоненты, такие как вода, почва, снежный покров, кровь, волосы и т. д. В нашей работе в качестве компонента окружающей среды были взяты солевые образования питьевых вод (накипь), которая образуется в результате многократного кипячения в нагревательных приборах, зарекомендовавшие себя как хороший индикатор качества питьевых вод [7, 8, 14, 19].

Данные по содержанию урана в накипи позволят спрогнозировать ореол распространения радиоактивного элемента. Поступая с водой в организм человека, уран может накапливаться в различных органах, оказывая негативное влияние. Нередко этот элемент называют «почечным ядом» [2]. Часто урану сопутствует элемент торий, который может обладать тератогенным эффектом [23].

Цель работы: оценить уровень содержания урана и тория в солевых отложениях питьевых вод на территории Южного Казахстана.

Материалы и методы

Пробы были отобраны в двух областях на территории Южного Казахстана – Кызылординская область (п. Шиели, п. Жанакорган) и Туркестанской области (п. Коксарай, п. Тулькибас, г. Туркестан, п. Сарыагаш). Общее количество проанализированных проб – 44.

При пробоподготовке и анализе проб накипи руководствовались методикой, изложенной в патенте № 2298212 «Способ определения участков загрязнения ураном окружающей среды» [16]. Солевые отложение отбирались из эмалированных чайников, с помощью ножа из нержавеющей стали. Во всех полученных пробах использовалась водопроводная вода, которая идет на питьевое водоснабжение. Проба

высушивалась при комнатной температуре, затем в агатовой ступке истиралась до состояния пудры. Далее по 100 мг упаковывалась в алюминиевую фольгу и отправлялась на дальнейший анализ.

Содержание урана и тория определялось методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) с использованием исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т ТПУ (ядерно-геохимическая лаборатория Международного инновационного научно-образовательного центра «Урановая геология», аттестат аккредитации № RA.RU.21АБ27 от 08.04.2015 г., аналитики – А. Ф. Судыко, Л. Ф. Богутская). Данный метод эффективен для определения радиоактивных элементов [17, 24].

Результаты и их обсуждение

Полученные данные говорят о неравномерном распределении тория и урана в солевых отложениях питьевых вод на изучаемой территории (табл. 1, рис. 1, 2). Среднее содержание составило для Th – 0,09 мг/кг; для U – 30,1 мг/кг, что сильно отличается от кларка для осадочных карбонатных пород: Th – 4,3 мг/кг; для U – 2,2 мг/кг [4]. Также можно обратить внимание на широкий разброс минимальных и максимальных значений от 0,0003 до 0,65 мг/кг для тория и 6,5 до 60,7 мг/кг для урана. Максимальные концентрации тория характерны для поселков Сарыагаш и Коксарай, урана для поселков Коксарай, Шолаккорган, Шиели, Жанакорган. Повышенные концентрации урана в данных поселках можно объяснить тем, что здесь происходит добыча урановой руды. Значение Th/U отношений составляет 0,003 что говорит в целом о природной составляющей данного образования.

В сравнении с травертинами (природные карбонатные образования) накипь изучаемой территории характеризуется более высокими концентрациями урана и тория.

Также нами был рассчитан коэффициент концентрации относительно накипи воды озера Байкал,

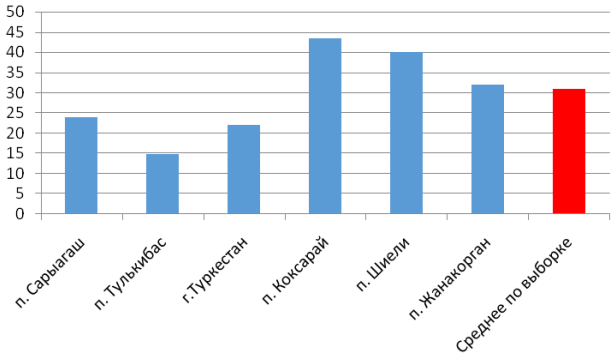


Рис. 1. Содержание U в солевых отложениях питьевых вод Южного Казахстана

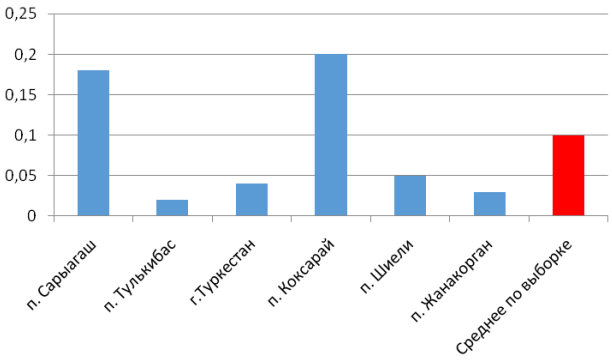


Рис. 2. Содержание Th в солевых отложениях питьевых вод Южного Казахстана

Таблица 1. Среднее содержание Th и U на изучаемой территории

Район исследования	Th мг/кг	U мг/кг	Th/U
п. Сарыагаш (9)	0,18 ± 0,06 / 0,01–0,65	24 ± 3,6 / 6,5–38	0,008
п. Тулькибас (6)	0,02 ± 0,004 / 0,0003–0,03	14,8 ± 0,8 / 12,7–17,3	0,001
г. Туркестан (4)	0,04 ± 0,002 / 0,03–0,04	22 ± 0,9 / 20,2–24	0,002
п. Коксарай (5)	0,2 ± 0,06 / 0,003–0,4	43,4 ± 5,3 / 30,4–57,2	0,005
п. Шиели (8)	0,05 ± 0,01 / 0,001–0,13	40,1 ± 5,1 / 16,5–60,7	0,001
п. Жанакорган (7)	0,03 ± 0,009 / 0,002–0,07	32 ± 5,6 / 15,2–58,9	0,001
Среднее по выборке	0,1 ± 0,02 / 0,0003–0,65	31 ± 2,21 / 6,5–60,7	0,003
Накипь воды озера Байкал	0,4	4,5	0,09
Травертины Памукале	0,03	1,02	0,029

числитель – среднее ± арифметическая ошибка; знаменатель – min и max значения.

взятой как условно чистая вода [12]. По элементу торий коэффициент концентрации (КК) не превышал 1. По урану во все населенных пунктах КК > 1: Коксарай (9,6), Шиели (8,9), Жанакорган (7,1), Сарыагаш (5,3), Туркестан (4,8), Тулькибас (3,3). Что говорит о накоплении урана в солевых образованиях питьевых вод на территории Южного Казахстана.

Содержание урана выше среднего (57,2–60,7 мг/кг) наблюдается в поселках Коксарай, Шиели и Жанакорган (рис. 1). Максимальные концентрации урана приурочены к Сырдарьинской урановорудной провинции. Данные поселки располагаются рядом с урановыми месторождениями (Заречное, Асарчик, Карамурун, Харасан, Ирколь), где активно ведется добыча урана методом подземного скважинного выщелачивания.

Содержание тория в поселках Сарыагаш и Коксарай выше остальных рассматриваемых территорий и выше среднего содержания (рис. 2). Высокое содержание тория в накипи в п. Сарыагаш возможно связано с имеющимися на этой территории месторождениями урана, природного газа, золота, редких металлов, кварцевых песков, источников минеральных вод. Также на территории п.Сарыагаш имеются запасы бентонитовых глин которые являются природными сорбентами [1, 3], возможно накапливая торий в своем составе, но это требует дальнейших исследований.

При сравнении с данными [5, 9, 13, 18] по другим регионам (рис. 3) видно, что изучаемые отложения на территории Южного Казахстана характеризуются достаточно высокими содержаниями урана. Средняя концентрация тория минимальна для всех рассматриваемых территорий. Можно обратить внимание, что среднее содержание урана для территории Казахстана в целом выше, чем для рассматриваемых территорий Российской Федерации.

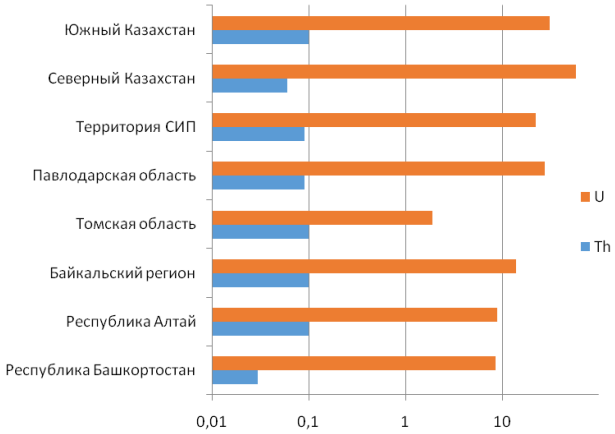


Рис. 3. Среднее содержание урана и тория в солевых образованиях питьевых вод некоторых территорий Казахстана и России

Заключение

В результате проведенных нами исследований можно сказать о неравномерном распределении радиоактивных элементов в накипи питьевых вод. Накопления урана в солевых образованиях питьевых пресных вод формируется в основном благодаря геологическому строению и месторождениям урановых руд. Th/U отношение в накипи питьевых вод Южного Казахстана характеризуется низкими значениями (0,003) что в большей степени обусловлено геологической составляющей региона. Особый интерес вызывает содержание тория в поселке Сарыагаш, что требует дальнейшего изучения.

Литература

1. Ахмедова Н. М., Тошназаров А. Х., Мухамадиев А. Р. Экологические последствия добычи урана методом подземного выщелачивания и оценка влияния радионуклидов на окружающую среду // Евразийский союз ученых (ЕСУ), 2020. – № 11 (80). – С. 7–12.
2. Барановская Н. В., Игнатова Т. Н., Рихванов Л. П. Уран и торий в органах и тканях человека // Вестник Томского государственного университета, 2010. – № 339. – С. 188.
3. Васильянова Л. С. Бентониты в экологии // Новости науки Казахстана, 2016. – № 3 (129). – С.70–101.
4. Григорьев Н. А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 383 с.
5. Джамбаев М. Т. Индикаторные свойства элементного состава компонентов экосистемы территории влияния Семипалатинского испытательного полигона: дис…канд.биол.наук. – Томск, 2019. – 145 с.
6. Иванов В. В. Экологическая геохимия элементов: Справочник: в 6 кн. – М.: Недра, 1997. – С. 607.
7. Монголина Т. А., Барановская Н. В., Соктоев Б. Р. Элементный состав солевых отложений питьевых вод Томской области // Известия ТПУ, 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 204–211.
8. Особенности элементного состава солевых образований питьевых вод юга Томской области / Е. Г. Язиков, Л. П. Рихванов, Н. В. Барановская и др. // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2009. – № 4. – С. 375–381.
9. Робертус Ю. В., Рихванов Л. П., Соктоев Б. Р. Особенности химического состава солевых отложений подземных питьевых вод Республики Алтай // Известия Томского политехнического университета, 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 190–195.

10. Сапрыкин Ф. Я. Геохимия почв и охрана природы. – Л.: Недра, 1989. – С. 231.
11. Сауков А. А. Геохимические очерки. – М.: Наука, 1976. – С. 556.
12. Соктоев Б. Р., Рихванов Л. П., Тайсаев Т. Т., Барановская Н. В. Геохимическая характеристика солевых отложений питьевых вод Байкальского региона // Известия Томского политехнического университета, 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 209–223.
13. Соктоев Б. Р., Рихванов Л. П., Арынова Ш. Ж., Барановская Н. В. Естественные радиоактивные элементы (Th, U) в солевых отложениях природных пресных вод // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Материалы V Международной конференции. – Томск, 2016. – С. 599–603.
14. Солевые образования питьевых вод как индикаторная среда в эколого-геохимических и металлогенических исследованиях / Б. Р. Соктоев, Л. П. Рихванов, Ш. Ж. Усенова и др. // Вестник Иркутского гос. техн. ун_та, 2014. – № 1 (84). – С. 40–45.
15. Соловов А. П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1985. – С. 294.
16. Способ определения участков загрязнения ураном окружающей среды: пат. 2298212 Рос. Федерация. Л. П. Рихванов, Е. Г. Язиков, Н. В. Барановская, Е. П. Янкович; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2005120840; заявл. 04.07.05; опубл. 27.04.07.
17. Судыко А. Ф. Определение урана, тория, скандия и некоторых редкоземельных элементов в двадцати четырех стандартных образцах сравнения инструментальным нейтронно-активационным методом // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Международной конференции. – Томск: STT, 2016. – С. 620–624.
18. Фархутдинов И. М., Соктоев Б. Р., Рихванов Л. П., Фархутдинов А. М., Злобина А. Н., Исмагилов Р. А., Никонов В. Н., Белан Л. Н. Влияние геологических факторов на распределение урана и тория в солевых отложениях питьевых вод (Республика Башкортостан) // Известия Томского политехнического университета, 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 16–27.
19. Язиков Е. Г., Рихванов Л. П., Барановская Н. В. Индикаторная роль солевых образований в воде при геохимическом мониторинге // Известия вузов. Геология и разведка, 2004. – № 1. – С. 67–69.
20. Asubiojo O. I., Nkono N. A., Ogunsua A. O., Oluwole A. F., Ward N. I., Akanle O. A., Spyrou N. M. Trace elements in drinking and groundwater samples in Southern Nigeria // Science of The Total Environment, 1997. – Vol. 208. – P. 1–8.
21. Flem B., Reimann C., Fabian K., Birke M., Filzmoser P., Banks D. Graphical statistics to explore the natural and anthropogenic processes influencing the inorganic quality of drinking water, ground water and surface water // Applied Geochemistry, 2018. – Vol. 88. – P. 133–148.
22. Hadiani M. R., Dezfooli-manesh Sh., Shoeibi Sh., Ziarati P., Khaneghah A. M. Trace elements and heavy metals in mineral and bottled drinking waters on the Iranian market // Food Additives & Contaminants: Part B, 8:1, 2015. – Vol. 8. – P. 18–24.
23. Levels of uranium and thorium in maternal scalp hair and risk of orofacial clefts in offspring / Yihui Wei, Lei Jin, Zhiwen Li, Jufen Liua, Linlin Wanga, Xin Pia, Shengju Yina, Chengrong Wanga, Aiguo Rena // Journal of Environmental Radioactivity, 2019. – V. 204. – P. 125–131.
24. Witkowska E., Szczepaniak K., Biziuk M. Some applications of neutron activation analysis: a review // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2005. – V. 265. – P. 141–150.

Pb-210 И Cs-137 В ДОННЫХ ОСАДКАХ МАЛЫХ ОЗЁР СЕВЕРА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

В. П. Шевченко[1], Р. А. Алиев[2], Н. М. Кокрятская[3], Д. П. Стародымова[1], Д. А. Субетто[4], А. В. Травкина[5], А. В. Чупаков[3]

[1]Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
Москва, Россия, vshevch@ocean.ru, d.smokie@gmail.com
[2]Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Москва, Россия, ramiz.aliev@gmail.com
[3]Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН
Архангельск, Россия, nkokr@yandex.ru, artem.chupakov@gmail.com
[4]Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена
Санкт-Петербург, Россия, subetto@mail.ru
[5]Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН
Москва, Россия, a_travkina@mail.ru

Pb-210 AND Cs-137 IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF SMALL LAKES IN THE NORTHERN EUROPEAN PART OF RUSSIA

V. P. Shevchenko[1], R. A. Aliev[2], N. M. Kokryatskaya[3], D. P. Starodymova[1], D. A. Subetto[4], A. V. Travkina[5], A. V. Chupakov[3]

[1]Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia,vshevch@ocean.ru, d.smokie@gmail.com
[2]National Research Center "Kurchatov Institute"
Moscow, Russia,ramiz.aliev@gmail.com
[3]N. LaverovFederal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Arkhangelsk, Russia,nkokr@yandex.ru, artem.chupakov@gmail.com
[4]Herzen State Pedagogical University of Russia
St. Petersburg, Russia, subetto@mail.ru
[5]Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia,a_travkina@mail.ru

The authors summarized the results of studies on the distribution of ^{210}Pb and ^{137}Cs in bottom sediments of small lakes in the north of European Russia. It is shown that the rates of sedimentation in most of the studied lakes are relatively low (0.75–2.2 mm/year). The ^{137}Cs concentration in the studied sediments is at the background level for Northern Europe. The vertical distribution of ^{137}Cs in bottom sediments is characterized by an increase in its concentration towards the upper layers, starting from a depth corresponding to the time of active global nuclear tests.

Введение

Донные осадки озёр являются природными архивами веществ, в том числе загрязняющих, поступающих из разных источников, поэтому их изучают с целью реконструкции экологической обстановки прошлого [2, 8, 14, 22–24].

Наибольшее распространение при определении скорости накопления современных донных осадков (до 100–150 лет) и дальнейшего расчета возраста отдельных их слоёв получил метод, основанный на измерении активности «избыточного» (неравновесного) ^{210}Pb [7, 10, 16, 17, 19]. Этот метод применим в тех случаях, когда скорости осадконакопления достаточно высоки (десятые доли миллиметра в год и более), иначе нет возможности отобрать послойно донные осадки, накопившиеся за последние 100–150 лет. Датирование по ^{210}Pb позволяет реконструировать динамику антропогенного загрязнения водоёмов искусственными радионуклидами (в том числе ^{137}Cs), тяжелыми металлами и органическими токсикантами. Вертикальное распределение ^{137}Cs и ряда других искусственных радионуклидов в донных осадках водоёмов и в отложениях верховых болот используют для оценки степени антропогенного загрязнения окружающей среды и для подтверждения датирования по ^{210}Pb [5–7, 14, 21].

В данном докладе авторы обобщили результаты своих исследований распределения ^{210}Pb и ^{137}Cs в донных осадках малых озёр севера Европейской части России (как опубликованных [4, 9, 10, 15, 16], так и новых) и литературные данные других исследователей.

Материалы и методы

Активность ^{210}Pb и ^{137}Cs была изучена в донных осадках малых озёр севера Европейской части России, отобранных с помощью трубок гравитационного типа с вакуумным клапаном и торфяного бура (диаметр желонки 5 и 7,5 см) в 2006–2020 гг. Расположение озёр, в которых были отобраны керны донных осадков, показано на рисунке.

Измерения выполняли гамма-спектрометрическим методом. Для области низких энергий (^{210}Pb 46,5 кэВ и ^{241}Am 59 кэВ) использовали планарный детектор из сверхчистого германия GLP-36360/13P4 диаметром 36 мм, толщиной 13 мм. Для определения ^{137}Cs (по линии 661,6 кэВ) и ^{226}Ra (по линии ^{214}Bi 609 кэВ) использовали коаксиальный детектор из сверхчистого германия GEM30P4-76 относительной эффективностью 30 %. Все оборудование фирмы Ortec, США.

Калибровку по эффективности в области низких энергий (^{210}Pb) проводили по стандартному материалу IAEA-448. Калибровку для ^{137}Cs проводили по интеркалибровочному образцу MAPEP 97 S4, USDOE. Во всех случаях строилась зависимость эффективности регистрации от массы сухого препарата.Более подробно методика исследований описана в ряде работ [4, 9, 17].

Результаты и их обсуждение

В донных осадках озёр Кисло-Сладкого и Верхнего Ершовского, образовавшихся в результате их отделения от Белого моря пригляциоэвстатическом подъёме побережья и регрессии моря в голоцене, определить скорости осадконакопления не удалось, т. к. там, вероятно, значительно менялась интенсивность осадконакопления [15].

На острове Большом Соловецком средняя скорость осадконакопления в озере Исаковском, рассчитанная по неравновесному ^{210}Pb, составляет 1,6 мм/год, а в озере Святом – 2,1 мм/год [13]. Более высокая скорость осадконакопления в озере Святом, вероятно, связана с тем, что его берега в большей мере подвержены хозяйственной деятельности, повышающей эрозию водосбора озера и поступление дополнительного количества вещества в него. Скорости осадконакопления в озерах Исаковском и Святом в несколько раз ниже, чем в озерах Западной Швеции (3–5 мм/год) [23, 24] и ряде озёр Финляндии (2,1–18,2 мм/год) [20], находящихся также в бореальной зоне Северной Европы. Это связано с маленькими водосборными площадями первых, преобладанием аллохтонного материала в осаждаемых осадках и низкой продуктивностью водных экосистем.

На острове Анзер Соловецкого архипелага скорость осадконакопления в озере Банном составляла 1,16 мм/год, а в озере Надбанном 1,04 мм/год. Близкие значения скоростей осадконакопления были отмечены в малых озёрах севера Фенноскандиина приграничной территории между Россией, Норвегиейи Финляндией (0,7–1,6 мм/год) [2]. Активность ^{137}Cs в июле 2015 г. в поверхностном слое 0–1 см донных осадков озера Банного была 193 Бк/кг, а озера

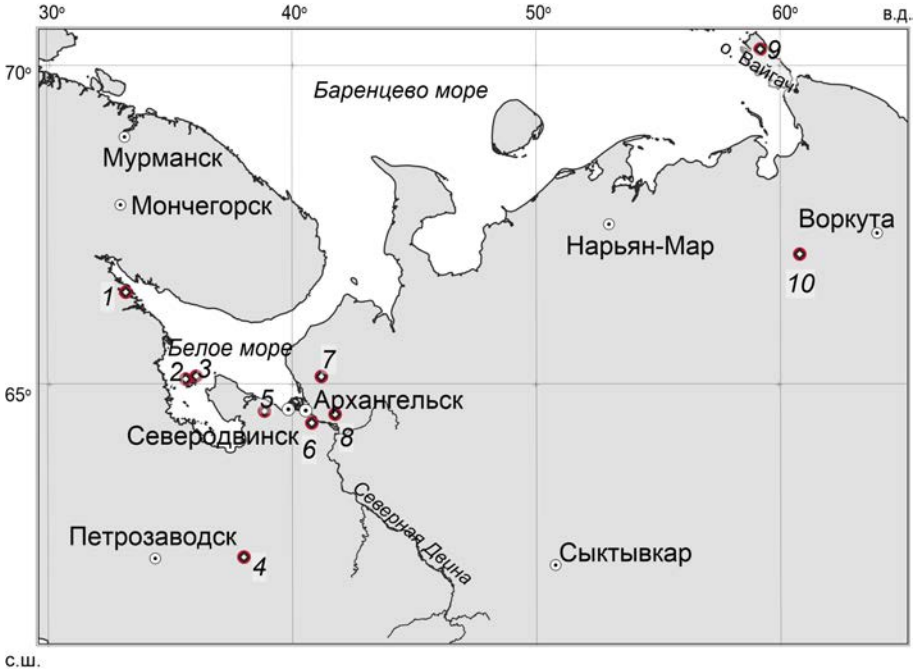


Рис. 1. Схема расположения изученных озёр

1 – полуостров Киндо (озёра Кисло-Сладкое и Верхнее Ершовское); 2 – остров Большой Соловецкий (озёра Исаковское (Лесное) и Святое); 3 – остров Анзер (озёра Банное и Надбанное); 4 – озеро Пежихерье; 5 – озеро Пикалёво; 6 – озеро Заднее; 7 – озеро Светлое; 8 – озеро Тёмное; 9 – озеро Талатинское; 10 – урочище Пымвашор (два безымянных озера).

Надбанного – 247 Бк/кг (здесь и далее активность в расчёте на сухой донный осадок). Более высокие значения активности ^{137}Cs были отмечены в слое 1–2 см в обоих озёрах (385 Бк/кг в озере Банном и 466 Бк/кг в озере Надбанном). Глубже активность быстро уменьшалась до минимальных значений на глубине 6–7 см, соответствующей периоду глобальных испытаний ядерного оружия, максимум которых был в 1961–1963 гг. [7].

В озере Пежихерье в его глубокой части (20 м) верхние 15 см донных осадков представлены желеобразной тёмной гиттией (содержание органического углерода в среднем 23,4 %); слой 15–56 см состоит из гомогенной тёмной гиттии с меньшим содержанием органики (в среднем 14,8 % органического углерода) [10]. Оценка скорости осадконакопления по неравновесному ^{210}Pb для слоя 0–9,5 см составляет 4,1 мм/год, а для слоя 9,5–16 см скорость седиментации уменьшилась до 0,1 мм/год. Активность ^{137}Cs в поверхностном слоедонных отложений (0–1 см) в июле 2014 г. была 48 Бк/кг и с глубиной она увеличивалась до 251 Бк/кг (9–10 см), а затем резко уменьшалась до предела обнаружения в слое 14–16 см. В изученном керне донных отложений максимальная активность ^{137}Cs приурочена к слою, образовавшемуся примерно во время аварии на Чернобыльской атомной электростанции (АЭС) в 1986 г.

В мелководном озере Пикалёво на Онежском полуострове Белого моря (максимальная глубина 6 м) в точке с глубиной 4 м была отмечена низкая скорость осадконакопления – 0,75 мм/год. Донные осадки этого озера в верхних слоях представлены алевро-пелитами и пелитами с высоким содержанием органического вещества (гиттией). В конце февраля 2017 г. активность ^{137}Cs в поверхностном слое 0–1 см была 138 Бк/кг, в слое 2–3 см– 195 Бк/кг, постепенно снижаясь вниз по разрезу до предела обнаружения в слое 9–10 см.

В мелководном озере Заднем, расположенном на левом берегу р. Северной Двиныв её нижнем течении, в точке с глубиной 3 м в феврале 2020 г. активность ^{137}Cs в поверхностном слое 0–1 см, представленным серовато-коричневой гиттией, составляла 63 Бк/кг.

В глубоком меромиктическом озере Светлом, расположенном в зоне северной тайги на Беломорско-Кулойском плато, скорость осадконакопления в точке с глубиной 36 м составляла 1,4 мм/год [9]. Активность ^{137}Cs в поверхностном слое 0–1см в апреле 2014 г. была 211 Бк/кг и постепенно снизилась до предела обнаружения в слое 7–8 см, соответствующем эпохе активных испытаний ядерного оружия в начале 1960-х годов.

В глубоком озере Тёмном (36 м в точке отбора керна), расположенном на заболоченном участке тайги у ЮВ подножия Беломорско-Кулойского плато, скорость осадконакопления составляла 1,05 мм/год. Активность ^{137}Cs в слое 0–1 см в июне 2015 г. была 391 Бк/кг и уменьшалась до предела обнаружения на 10 см. Незначительный пик (235 Бк/кг) был отмечен в слое 2–3 см, на который приходится время аварии на Чернобыльской АЭС. Такое сравнительно высокое значение активности ^{137}Cs, вероятно, обусловлено регулярным смывом в озеро радионуклидов из почвы на еговодосборе, куда радионуклиды поступали в результате глобальных испытаний ядерного оружия и аварии на Чернобыльской АЭС.

В донных осадкахозера Талатинского на острове Вайгач, представленных коричневыми алевро-пелитовыми илами с низким содержанием органического углерода (от 1,16 до 2,43 %), экспоненциального снижения удельной активности ^{210}Pb от поверхности вглубь осадковне наблюдалось, что, скорее всего, является следствием перемешивания слоев донных отложений этого водоема [4]. Активность ^{137}Cs в слое 0–1 см в середине августа 2010 г. была низкой (3,8 Бк/кг), глубже (до глубины в донном осадке 14 см) активность этого радиоизотопа распределена неравномерно в результате перемешивания донных осадков и в слое 12–13 см она достигала 19,1 Бк/кг.

Верхние слои донных осадков в двух малых озёрах в урочище Пымвашор, расположенном в Большеземельской тундре, представлены темной гиттией [16]. Для керна донных осадков из озера № 1 скорость осадконакопления определить не удалось, т.к.активности неравновесного ^{210}Pb в верхних 13 см осадков были распределены беспорядочно; активность ^{137}Cs в слое 0–1 см была 32 Бк/кг, в слоях 1–2 и 2–3 повышалась до 52 и 53 Бк/кг соответственно, а затем уменьшалась с глубиной до слоя 12–13 см. Скорость осадконакопления в озере № 2 в этом урочище в среднем была 2,2 мм/год, а активность ^{137}Cs в слое 0–1 см составила 64 Бк/кг и уменьшалась с глубиной.

Радиоактивность ^{137}Cs в поверхностном (0–1 см) слое изученных авторами малых озёр севера Европейской части России имеет более высокие значения в западных районах (озёра Банное, Надбанное, Пикалёво, Светлое, Темное), чем в восточных (озере Талатинское на острове Вайгач и озере в урочище Пымвашор), и они намного ниже значений, определенных в озерных отложенияхскандинавских стран [20, 23]. Последний факт связан с тем, что распределение этого радионуклида по поверхности Земли обусловленовыпадением егоиз атмосферы в период ядерных испытаний конца 50-х – начала 60-х годов XX века и после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г., а в Скандинавии выпадение продуктов этой аварии было значительно выше, чем на северо-западе Европейской территории России [3, 18].

Для вертикального распределения ^{137}Cs в донных осадках характерно увеличение его концентрации к верхним слоям, начиная с глубины, соответствующей времени активных глобальных ядерных испытаний. Аналогичная тенденция ранее была описана для озёр Сибири [1, 11, 12, 14]. Пик активности, соответствующий времени аварии на Чернобыль-

ской АЭС (1986 г.), чётко выражен только в донных осадках озера Пежихерье на юго-западе Архангельской области. Связано это, по-видимому, с тем, что значительная часть ^{137}Cs, выпавшего из атмосферы в результате испытаний ядерного оружия и аварии на Чернобыльской АЭС, сконцентрирована в верхнем дерновом слое почв, а при его разрушении в результате распахивания и пожаров поступает в озера за счет ветровой эрозии и смыва атмосферными осадками с водосбора.

Заключение

Авторы доклада обобщили результаты своих исследований по изучению распределения ^{210}Pb и ^{137}Cs в донных осадках малых озёр севера Европейской части России и литературные данные других исследователей.

Показано, что скорости осадконакопления в большинстве изученных озер сравнительно невысокие (0,75–2,2 мм/год) и в несколько раз ниже, чем в ряде озёр Скандинавии, находящихся также в бореальной зоне Северной Европы.Это связано с маленькими водосборными площадями первых, преобладанием аллохтонного материала в осаждаемых осадках и низкой продуктивностью водных экосистем.

Радиоактивность ^{137}Cs в поверхностном (0–1 см) слое изученных авторами доклада малых озёр севера Европейской части России имеет более высокие значения в западных районах, чем в восточных и намного ниже значений, отмеченных в скандинавских странах, т. к. в основном определяется перераспределением этого радионуклида, выпавшего из атмосферы в период ядерных испытаний конца 50-х – начала 60-х годов XX века и после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. В Скандинавии выпадение продуктов аварии было значительно выше, чем на северо-западе Европейской территории России.

Для вертикального распределения ^{137}Cs в донных осадках характерно увеличение его концентрации к верхним слоям, начиная с глубины, соответствующей времени активных глобальных ядерных испытаний. Пик активности, соответствующий времени аварии на Чернобыльской АЭС, в большинстве озёр четко не выражен, т. к. значительная часть ^{137}Cs, выпавшего из атмосферы в результате испытаний ядерного оружия и аварии на Чернобыльской АЭС, сконцентрирована в верхнем дерновом слое почв, разрушение которого за счет ветровой денудации и эрозии приводит к неравномерному поступлению ^{137}Cs в озера и его аккумуляции в донных отложениях.

В 2019–2021 гг. исследования были поддержаны РФФИ (грант № 19-05-00938-а) и госзадания Министерства просвещения РФ (№ FSZN-2020-16). Авторы благодарны всем коллегам, помогавшим в отборе проб донных осадков озёр и их анализе.

Литература

1. Большиянов Д. Ю. ^{137}Cs в осадках глубоких озёр / Д. Ю. Большиянов, Н. А. Бакунов, А. С. Макаров // Литология и полезные ископаемые, 2014. – № 2. – С. 178–185.
2. Даувальтер В. А. Тенденции изменения содержания тяжелых металлов в донных отложениях озёр севера Фенноскандии в последние столетия / В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин, Д. Б. Денисов // Труды Карельского научного центра РАН, 2015. – № 9. – С. 62–75.
3. Киселёв Г. П. Природная радиоактивность территории Европейского Севера и ее антропогенные изменения / Г. П. Киселёв, В. В. Кряучюнас, И. М. Киселева, В. Б. Зыков, А. В. Баженов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2005. – № 3. – С. 205–218.
4. Кокрятская Н. М. Ранний диагенез донных осадков пресноводных озёр острова Вайгач / Н. М. Кокрятская, В. П. Шевченко, К. В. Титова, Е. А. Вахрамеева, Р. А. Алиев, В. А. Григорьев, Ф. Е. Максимов, В. Ю. Кузнецов // ПроблемыАрктикииАнтарктики, 2020. – № 66 (4). – С. 534–554.
5. Мальцев А. Е. Геохимия сапропелей голоценовых разрезов из малых озер юга Западной Сибири и Восточного Прибайкалья / А. Е. Мальцев, Г. А. Леонова, В. А. Бобров, С. К. Кривоногов. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2019. – 444 с.
6. Рихванов Л. П. Реконструкция радиационной обстановки на территории Томской области по стратифицированным природным образованиям / Л. П. Рихванов, Ю. Л. Замятина, А. М. Межибор, Т. А. Архангельская, А. Ю. Иванов // Известия Томского политехнического университета, 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 199–203.
7. Сапожников Ю. А. Радиоактивность окружающей среды / Ю. А. Сапожников, Р. А. Алиев, С. Н. Калмыков. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 286 с.
8. Слуковский З. И. Особенности накопления свинца, сурьмы и кадмия в отложениях малых озёр юга Карелии / З. И. Слуковский, В. А. Даувальтер // Труды Карельского научного центра РАН, 2020. – № 4. – С. 75–94.
9. Стародымова Д. П. Геохимия тяжелых металлов в донных осадках озера Светлое (Архангельская область) / Д. П. Стародымова, К. А. Радченко, Д. А. Бычков, Р. В. Фяйзуллина, В. П. Шевченко, Н. М. Кокрятская, А. В. Травкина // Актуальные проблемы наук о Земле. Сборник трудов II научной конференции студентов и молодых ученых с международным участием (Южный федераль-

ный университет, 27 октября 2016 г.). – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. – С. 467–470.
10. Стародымова Д. П. Геохимия донных осадков малого озера (водосбор Онежского озера, Архангельская область) / Д. П. Стародымова, В. П. Шевченко, Н. М. Кокрятская и др. // Успехи современного естествознания, 2016. – № 9. – С. 172–177.
11. Страховенко В. Д. Закономерности распределения радионуклидов и редкоземельных элементов в донных отложениях озер Сибири / В. Д. Страховенко, Б. Л. Щербов, И. Н. Маликова, Ю. С. Восель // Геология и геофизика, 2010. – Т. 51. – № 11. – С. 1501–1514.
12. Страховенко В. Д. Распределение естественных радионуклидов в донных отложениях озёр различных ландшафтных зон Западной Сибири / В. Д. Страховенко, И. Н. Маликова, Е. А. Овдина, А. А. Денисенко // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Материалы V Международной конференции, г. Томск, 13–16 сентября 2016 г. – С. 614–619.
13. СубеттоД.А.ХронологияизоляцииозерСоловецкогоархипелагаискоростисовременногоозерногоосадконакопления/ Д. А. Субетто, В. П. Шевченко, А. В. Лудикова, Д. Д. Кузнецов, Т. В. Сапелко, А. П. Лисицын, В. Я. Евзеров, П. ванБеек (P. vanBeek), М. Суо (M.Souhaut), Г. Д. Субетто // ДокладыАкадемиинаук, 2012. – Т. 446. – № 2. – С. 183–190.
14. Таций Ю. Г. Донные отложения арктических озёр Западной Сибири как индикаторы изменений окружающей среды / Ю. Г. Таций, Т. И. Моисеенко, Л. В. Разумовский и др. // Геохимия, 2020. – Т. 65. – № 4. – С. 362–378.
15. Шевченко В. П. Эоловый материал в природных архивах / В. П. Шевченко, Р. А. Алиев, В. А. Бобров, В. В. Гордеев, Н. В. Горюнова, Л. Л. Демина, Н. С. Замбер, В. Б. Коробов, Е. И. Котова, О. Л. Кузнецов, В. И. Макаров, А. Н. Новигатский, О. С. Покровский, С. А. Попова, Ф. А. Романенко, Д. П. Стародымова, Д. А. Субетто, А. С. Филиппов // СистемаБелогоморя. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера / Отв. ред. Лисицын А. П., ред. Немировская И. А. – М.: Научный мир, 2012. – С. 70–107.
16. Шевченко В. П. Особенности геохимии тяжелых металлов в донных осадках малых озер урочища Пымвашор (Большеземельская тундра) / В. П. Шевченко, А. А. Любас, Д. П. Стародымова, И. Н. Болотов, О. В. Аксёнова, Р. А. Алиев, М. Ю. Гофаров, С. А. Игловский, Н. М. Кокрятская // Успехи современного естествознания, 2017. – № 1. – С. 105–110.
17. Aliev R. A. Natural and artificial radionuclides as a tool for sedimentation studies in the Arctic region / R. A. Aliev, V. A. Bobrov, S. N. Kalmykov, M. S. Melgunov, I. E. Vlasova, V. P. Shevchenko, A. N. Novigatsky, A. P. Lisitzin // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2007. – V. 274. – № 2. – P. 315–321.
18. Evangeliou N. Reconstructing the Chernobyl Nuclear Power Plant (CNPP) accident 30 years after. A unique database of air concentration and deposition measurements over Europe / N. Evangeliou, T. Hamburger, N. Talerko, S. Zibtsev, Y. Bondar, A. Stohl, Y. Balkanski, T. A. Mousseau, A. P. Møller // Environmental Pollution, 2016. – V. 216. – P. 408–418.
19. Goldberg E. D. Geochronology with ^{210}Pb // Radioactive Dating. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1963. – P. 121–131.
20. Ilus E.Accumulation of Chernobyl-derived ^{137}Cs in bottom sediments of some Finnish lakes / E. Ilus, R. Saxen// Journal of Environmental Radioactivity, 2005. – V. 82. – P. 199–221.
21. Krishnaswamy S. Geochronology of lake sediments / S. Krishnaswamy, D. Lal, J.-M. Martin, M. Meybeck // Earth and Planetary Science Letters, 1971. – V. 11. – P. 407–414.
22. Smol J. P. Pollution of Lakes and Rivers: A Paleoenvironmental Perspective. – London: Arnold, 2002. – 208 p.
23. Routh J.Sedimentary geochemical record of recent environmental changes around Lake Middle Marviken, Sweden/ J. Routh, P. A. Meyers, T. Hjorth, M. Baskaran, R. Hallberg // Journal of Paleolimnology, 2007. – V. 37. – P. 529–545.
24. Sternbeck J. Metals in sediments from the Stockholm Region: geographical pollution patterns and time trends / J. Sternbeck, P. Östlund // Water, Air, and Soil Pollution: Focus, 2001. – V. 1.– P. 151–165.

УРАН И ТОРИЙ В ОТЛОЖЕНИЯХ УКУРЕЙСКОЙ СВИТЫ ОЛОВСКОЙ ВПАДИНЫ ЗАБАЙКАЛЬЯ, ВМЕЩАЮЩИХ ИСКОПАЕМЫЕ ОСТАТКИ ПТИЦЕТАЗОВЫХ ДИНОЗАВРОВ НОВОГО РОДА *Kulindadromeus Zabaikalicus*

Г. А. Юргенсон, Е. А. Василенко

Институт природных ресурсов экологии и криологии СО РАН
Чита, Россия, yurgga@mail.ru, mr.evgeniy.vasilenko@gmail.com

URANIUM AND THORIUM IN SEDIMENTS OF THE UKUREISKAYA FORMATION OF THE OLOVSKAYA DEPRESSION IN TRANSBAIKALIA, WHICH CONTAIN FOSSIL REMAINS OF THE NEW GENUS *Kulindadromeus Zabaikalicus* AVIAN DINOSAURS

G. A. Yurgenson, E. A. Vasilenko

Institute of Natural Resources Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Chita, Russia, yurgga@mail.ru, mr.evgeniy.vasilenko@gmail.com

It was found that the average thorium content in all studied sections does not exceed the average crustal content and is within 6.6...23.5 ppm, reaching a maximum in the sandstones of the sections in the Kulinda locality, being associated with clastic zircon. Average uranium concentrations in the studied sections are characterized by significant differences, and for the sections of the StaryOlov and the vicinity of the village Novoberezovskoe. They are minimal and close to clarks (respectively, 1.37 and 3.47 ppm). Rocks of the sections in the Kulinda locality are characterized by high concentrations in apotuffsiltstone and chlidolite (respectively,38.93 and 35.46 ppm), which contain the remains of dinosaur fauna.

Введение

В 2010 году сотрудником ИПРЭК СО РАН С. М. Синица [4] в терригенных и вулканогенно-осадочных отложениях укурейской свиты юрского возраста Оловской впадины Забайкальского края найдены ископаемые остатки ранее неизвестного науке позвоночного животного. В результате последующих экспедиционных исследований было собрано достаточное количество фактического материала, на основании которого совместно с зарубежными коллегами описан новый род и вид растительноядных оперенных птицетазовых динозавров *Kulindadromeus zabaikalicus* [8]. К 2019 году стало известно, что Кулиндадромеус забайкальский является самым древним из ныне известных динозавров с перьеобразными структурами [7]. Учитывая уникальность местонахождения Кулинда, на нем проводятся комплексные исследования [5, 2, 6], в том числе организован учебно-научный стационар [3]. К настоящему времени возникла необходимость поисков новых разрезов в Оловской впадине, которые могли бы содержать остатки динозавровой фауны, подобной выявленной в отложениях укурейской свиты в пади Кулинда. Ранее [1] было установлено, что одним из геохимических признаков отложений пади Кулинда, содержащих ископаемые остатки динозавров является их повышенная ураноносность. Поэтому с целью оценки вероятности новых проявлений динозавровых слоев выбрали два обнаженных разреза укурейской свиты в районе с. Новоберёзовское и в окрестностях с. Старый Олов (рис. 1).

Материалы и методы

Для изучения содержания тория и урана в отложениях укурейской свиты Оловской впадины Забайкалья был проведен отбор проб в указанных местах её обнажения (см. рис. 1.).

Всего отобрано и проанализировано 102 пробы, из которых 73 приходятся на падь Кулинда, 11 – СтарыйОлов и 18 – Новоберезовское. Анализы выполнены в аналитической лаборатории «СЖС Восток Лимитед» методом ICP MS. Полученные результаты обработаны методами математической статистики. Для диагностики горных пород проведено их микроскопическое изучение в прозрачных шлифах на микроскопе AxioScope A-1. Кроме того, часть образцов из обнажений пади Кулинда изучена электронно-микроскопическим методом в лаборатории ГИН СО РАН, руководитель к.т.н. С. В. Канакин.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрено распределения тория и урана в отложениях укурейской свиты Оловской впадины в Восточном Забайкалье. Среди отобранных образцов выделены следующие горные породы: апоалевролиты, апотуфоалевролиты, песчаники, хлидолиты и дресвяники.

В разрезе, вскрытом канавами в пади Кулинда присутствуют все указанные горные породы. Разрезы отложений в районе с. Новоберёзовское и в окрестностях с. Старый Олов в обнажениях вскрыты песчаники.

Обработка полученных аналитических данных показала, что метаморфизованные в ранней стадии альбит-хлоритовой субфации фации зеленых сланцев вулканогенно-осадочные отложения в пади Кулинда характеризуются повышенным содержанием урана (n = 73, x = 21,48 ppm, σ = 24,02) и примерно в два раза меньшим тория (n = 73, x = 10,51 ppm, σ = 5,59 [8].

В разрезе Новоберезовское содержание тория практически равно кларку (n = 18, x = 13,05 ppm, σ = 2,62), а содержание урана выше кларка (n = 18, x = 3,47 ppm , σ = 1,35). В обнажении Старый Олов торий и уран не превышают кларк. Данные соответственно: торий – n = 11, x = 11,8 ppm, σ = 1,73; уран – n = 11, x = 1,37 ppm, σ = 0,24.

Пределы содержания тория и урана по всем горным породам показаны в таблице 1.

Видно, что наименьшие содержания тория во всех разрезах не превышают величину кларка, а максимальные превышают его лишь незначительно. Минимальные содержания урана превышают кларк лишь в песчаниках пади Кулинда, а максимальные – в тонкозернистых буроватых песчаниках в разрезе Новоберезовское (в 2,6 раз) и в апотуфоалевролитах пади Кулинда (в 45,9 раз), вмещающих остатки динозавров.

Средние содержания тория и урана в изученных отложениях укурейскойсвиты показаны на рис. 2.

Таблица 1. Пределы содержания тория и урана в разрезах отложений укурейской свиты

Пределы содержания, ppm		
Места отбора проб горных пород	Th	U
Новоберезовское	8,3–18,2	1,1–7
Старый Олов	9,3–14,4	1,02–1,8
падь Кулинда	0,4–16,6	4,4–124

Видно, что в разрезах в окрестностях с. Старый Олов и в районе с. Новоберёзовское содержания тория находятся в пределах кларка, а в пади Кулинда примерно в два раза меньше (6,9 ppm). Для урана, наоборот, концентрации достигают предельных величин. Это обусловлено, как можно понять из анализа данных табл. 2, прежде всего, высокими его содержаниями в апотуфоалевролите (38,93 ppm) и хлидолите (35,46 ppm), вмещающх остатки динозавровой фауны.

Распределение рассматриваемых химических элементов тория варьирует незначительно, находясь в пределах кларка (табл. 2). При этом минимальны его содержания в хлидолите и дресвянике. Это можно объяснить различным содержанием основного носителя тория обломочного циркона в дресвяниках и хлидолитах, с одной стороны, где его мало, и в песчаниках и алевролитах, где его больше, – с другой. Об этом свидетельствуют результаты электронно-зондовых исследований. Из таблицы 2 видно, что среди горных пород укурейской свиты наименьшие содержания тория определены в дресвяниках, а наи-

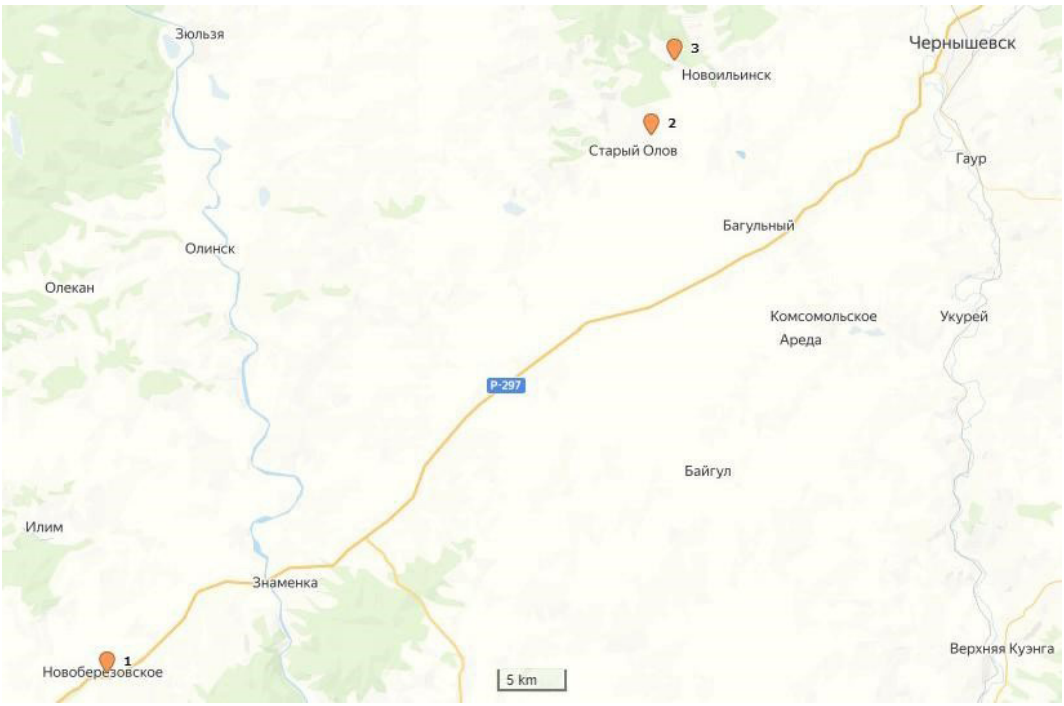


Рис. 1. Места отбора проб: 1 – Новоберезовское, 2 – СтарыйОлов, 3 – падь Кулинда

Таблица 2. Средние содержания тория и урана в каждом типе горных пород разреза в пади Кулинда

Среднее содержание в горных породах, ppm					
Элемнт	апоалевролит	апотуфоалевролит	апопесчаник	хлидолит	дресвяник
Th	13,2	7,94	11,25	7,23	3,43
U	3,47	38,93	9,58	35,46	8,9

большие в апоалевролитах. Наименьшие содержание урана определены в алевролитах, а наибольшие в туфоалевролитах и хлидолитах. Это связано с тем, что в них находятся фосфаты и фосфосиликаты урана, образовавшиеся в процессе метаморфизма зеленосланцевой фации, которой соответствуют постседиментационные изменения этих туфоалевролитов и хлидолитов, содержащих бывшие костные фрагменты скелетов динозавров.

Сравнительный анализ тория и урана по всем горным породам представляется возможным провести только среди песчаников, т. к. они встречаются во всех местах отбора проб. Рассмотрим пределы содержания тория и урана в песчаниках (таблица 3).

Из табл. 3 видно, что наибольшие вариации содержания тория характерны для песчаников отложений падь Кулинда, в которых изредка присутствуют остатки динозавровой фауны, а наименьшие для отложений укурейской свиты в районе с. Старый Олов. Таково же и распределение урана в этих горных породах. При этом максимальные его содержания в 7,2 раза превышают таковые в песчаниках разреза в окрестностях с. Новоберезовское и в 21,9 раз разреза в районе с. Старый Олов.

Соотношение средних содержаний тория и урана в песчаниках рассматриваемых разрезов иные (рис. 3). В отличие от вариаций содержаний среднее для песчаников уменьшается от разреза в окрестностях с. Новоберезовское (10,3 ppm) до 9,8 ppm в пади Кулинда, в целом не превышая величину кларка.

Распределение средних содержаний урана в рассматриваемых отложениях аналогично вариациям его содержания в отдельных образцах. Минимально оно в разрезе окрестностей с. Старый Олов и примерно соответствует кларку, а максимально в

Таблица 3. Пределы содержания тория и урана в песчаниках

Пределы, содержания, ppm		
Места отбора проб горных пород	Th	U
Новоберезовское	9,6–18,2	2,1–5,5
Старый Олов	9,3–14,4	1,02–1,8
Падь Кулинда	6,6–23,5	3,24–39,5

разрезах пади Кулинда, где оно превышает его величину в 10 раз. Это соотносится с наличием здесь ископаемых остатков динозавров *Kulindadromeus zabaikalicus*, по которым развиваются фосфосиликаты урана, содержащие также и РЗЭ и цирконий, как это установлено электронно-микроскопическими исследованиями.

Заключение

1. Впервые проведенный сравнительный анализ содержания тория и урана в выходах отложений укурейской свиты в пади Кулинда, где найдены ископаемые остатки динозавров *Kulindadromeus zabaikalicus*, а также разрезов в районе с. Старый Олов и окрестностях с. Новоберёзовка, показал, что распределение в них тория и урана четко различаются.

2. Средние содержания тория во всех изученных разрезах не превышает среднее содержание Земной коры и находится в пределах 6,6…23,5 ppm, максимума достигая в песчаниках разрезов в пади Кулинда, будучи связанными с обломочным цирконом.

3. Средние содержания урана в изученных разрезах характеризуется существенными различиями, и для разрезов района Старого Олова и окрестно-

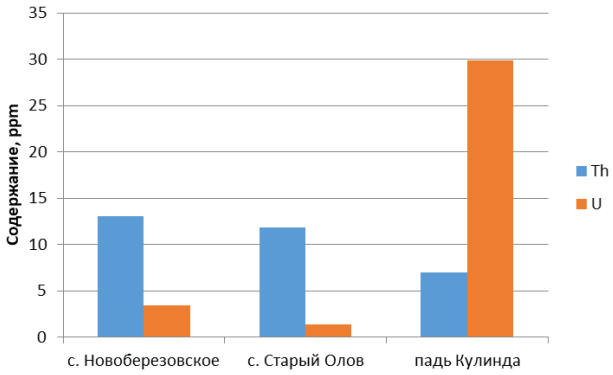


Рис. 2. Средние содержания тория и урана в отложениях укурейской свиты

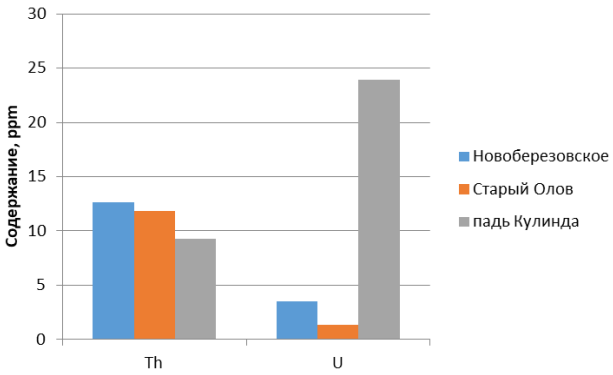


Рис. 3. Средние содержание тория и урана в песчаниках

стей с. Новоберёзовское они минимальны и близки к кларкам (соответственно 1,37 и 3,47 ppm), тогда как в горных породах разрезов в пади Кулинда отличаются высокими его содержаниями в апотуфоалевролите (38,93 ppm) и хлидолите (35,46 ppm), вмещающх остатки динозавровой фауны. Уран здесь по данным электронно-микроскопических исследований связан с тонкообломочным монацитом и фосфосиликатами урана.

Литература

1. Василенко Е. А., Юргенсон Г. А., Синица С. М., Решетова С. А. Первые данные о содержаниях тория и урана в отложениях, вмещающих остатки динозавров *Kulindadromeuszabaikalicus* / Василенко Е. А., Юргенсон Г. А., Синица С. М., Решетова С. А. // Аспирант. Приложение к журналу Вестник Забайкальского государственного университета, 2018. – Т. 12. – № 2. – С. 8–14.
2. Пещевицкая Е. Б. Палинологическая характеристика среднеюрских отложений из местонахождения Кулинда (Забайкалье): биостратиграфический и биофациальный анализ / Пещевицкая Е. Б., Решетова С. А., Синица С. М. // Литосфера, 2018. – Т. 18. – № 3. – С. 382–389.
3. Помазкова Н. В. Создание учебно-научного стационара «Кулинда» и перспективы вовлечения региональной ООПТ в социально-экономическое развитие района / Помазкова Н. В. // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле, 2019. – Т. 29. – № 2. – С. 290–299.
4. Синица С. М. Синица Софья Михайловна член редакционного совета журнала «Вестник забайкальского государственного университета» / Синица С. М. // Вестник Забайкальского государственного университета, 2020. – Т. 26. – № 3. – С. 121
5. Синица С. М. Юрские палеоэкосистемы местонахождения птицетазовых динозавров Кулинда (Оловская впадина, Забайкалье) / Синица С. М. // Вестник Забайкальского государственного университета, 2018. – Т. 24. № 5. – С. 21–35.
6. Синица С. М., Вильмова Е. С. Обстановки седиментации и этапы развития наземной и водной биоты местонахождения юрских оперенных динозавров Кулинда (Оловская впадина, забайкалье) / Синица С. М., Вильмова Е. С. // Вестник Забайкальского государственного университета, 2016. – Т. 22. – № 9. – С. 42–51.
7. Cincotta A. The rise of feathered dinosaurs: kulindadromeuszabaikalicus, the oldest dinosaur with ‘feather-like’ structures / Cincotta A., Godefroit P., Yans J., Pestchevitskaya E. B., Sinitsa S. M., Reshetova S. A., Markevich V. S., Debaille V., Mashchuk I. M., Frolov A. O., Gerdes A. // PeerJ., 2019. – V. 2019. – № 2. – C. 6239.
8. Godefroit P. A Jurassic ornithischian dinosaur from Siberia with both feathers and scales / Godefroit P., Sinitsa S. M., Dhouailly D., Bolotsky Yu. L., Sizov A., McNamara M., Benton M., Spagna P. // Science, 2014. – Vol. 345. – P. 451–455.

ПОДГОТОВКА И ПЕРЕПОДГОТОВКА КАДРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА «УРАНОВАЯ ГЕОЛОГИЯ» ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Е. Г. Язиков, С. И. Арбузов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050, yazikoveg@tpu.ru

TRAINING AND RETRAINING OF PERSONNEL USING THE RESOURCE POTENTIAL OF THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL CENTER "URANIUM GEOLOGY" OF TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

E. G. Yazikov, S. I. Arbusov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050, yazikoveg@tpu.ru

A brief historical background of training specialists in the field of uranium geology for the country is presented. In 2008, the international scientific and educational center «Uranium Geology» was opened at Tomsk Polytechnic University. The center has a modern laboratory base and a unique collection of uranium ores and minerals of rare and radioactive elements, which allows for high-quality training of masters in the profile «Geology of deposits of strategic metals». The long-term experience of Tomsk Polytechnic University in personnel training for NAC "Kazatomprom" is analyzed. Combining the efforts of the two engineering schools of TPU allowed developing unique programs that have been in demand for more than six years by the uranium mining enterprises of Kazakhstan.

Международный научно-образовательный центр подготовки специалистов в области урановой геологии для развития ядерной энергетики был создан в 2008 году на базе кафедры геоэкологии и геохимии ТПУ, которая ранее под названием кафедра геологии и разведки руд редких и радиоактивных элементов с 1954 года на протяжении 35 лет готовила специалистов для Первого Главка Министерства Геологии СССР (организатор и первый заведующий – член-корреспондент АН СССР Ф. Н. Шахов).

Первый выпуск горных инженеров-геологов по урановому профилю состоялся в 1956 году. В 1957 году было сделано два выпуска: первый – в феврале, второй – в декабре. Стране требовались специалисты – уранщики. Всего по состоянию на 01.08.1997 год кафедрой подготовлено 756 специалистов при приёме студентов 25 человек в год. Пятнадцать выпускников стали докторами наук. Дипломы первооткрывателя месторождений получили 35 выпускников и 4 сотрудника кафедры. Многие выпускники за выдающиеся успехи в работе награждены орденами и медалями, в том числе двое – высшей наградой СССР – орденом Ленина (В. А. Шлейдер, В. С. Чечеткин). Лауреатами Государственной премии СССР стали сотрудник кафедры Вьюнов Ф. И. и её выпускники: В. А. Шлейдер, Н. И. Рубанов, В. А. Медведев.

К сожалению, события 90-х годов, приведшие к распаду СССР, привели к закрытию в 1995 году подготовки специалистов в области урановой геологии. Инициатива создания Центра по подготовке специалистов по урановой геологии принадлежит компании «БАЗЭЛ», менеджеры которой (В. Г. Язиков, Ф. К. Мурашов и др.) в начале 2007 года остановили свой выбор по подготовке специалистов для урановой энергетики на Томском политехническом университете.

Возобновление подготовки специалистов обусловлено острой потребностью в них государственных и частных компаний, работающих в уранодобывающей отрасли (ФГУП «Урангео», НАК «Казатомпром» и др.). Томский политехнический университет был выбран на конкурсной основе как базовый ВУЗ для подготовки специалистов для урановой отрасли. Этот проект реализовывался также в рамках инновационной образовательной программы (ИОП) Томского политехнического университета в качестве развития в университете опережающей подготовки элитных специалистов и команд профессионалов мирового уровня по приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий, удостоенной гранта Минобрнауки РФ по приоритетному национальному проекту «Образование».

Исключительными профессиональными компетенциями выпускника данной программы являются: 1) поиски, разведка, геолого-экономическая оценка и разработка месторождений радиоактивного сырья; 2) создание модели месторождения; 3) получение новой минералого-геохимической информации с использованием современных ядерно-физических методов, в том числе на базе ядерного реактора.

Подготовка специалистов по урановому направлению осуществляется с использованием уникаль-

ного современного оборудования (альфа- и гамма-спектрометры, оптические микроскопы с системой визуализации, а также японский сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-3400N, имеющий разрешение 10 нм с системой энергодисперсионного микроанализа) и программных комплексов, приобретенных в Центр при реализации программы ИОП.

В подготовке специалистов для урановой отрасли задействована ядерно-геохимическая лаборатория, размещенная на площадях исследовательского ядерного реактора Томского политехнического университета, которая активно используется как современный инструмент подготовки специалистов для урановой геологии и проведения научных исследований в области разработки радиогеохимических методов прогнозирования и поисков руд редких и радиоактивных элементов, для комплексной оценки месторождений на содержание ценных (золото и др.) и токсичных (мышьяк и др.) элементов. Аналогов подобных лабораторий в России нет.

Для организации учебного процесса по подготовке специалистов для урановой отрасли используются уникальные коллекции минералов и руд различных типов урановых и редкометалльных месторождений бывшего СССР, которые хранятся в специально оборудованном хранилище общей площадью 20 м^2. Этот коллекционный фонд насчитывает около 1000 образцов (аналогов в России нет).

Подготовка магистров по направлению «Геология» – профиль «Геология месторождений радиоактивного сырья» на кафедре геоэкологии и геохимии ТПУ, с использованием материальной и научно-методической базы международного научно-образовательного центра «Урановой геологии», начата в 2008 году. В настоящее время выпускники данного профиля работают в компаниях «Русбурмаш», ОАО «Приаргунский ГХК», ОАО «Далур», НАК «Казатомпром» и др.

В связи с принятием государственной программы (№ 2539-р от 27 декабря 2012 года) «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности» (подпрограмма «Технологии редких и редкоземельных металлов») в Томском политехническом университете с 2014 года открылся новый профиль магистратуры «Геология месторождений стратегических металлов» в рамках направления «Геология», который расширяет области подготовки специалистов с учетом геологии месторождений радиоактивных, редких и редкоземельных элементов. Обучение ведется как на бюджетной форме обучения, так и на платной основе.

Наряду с подготовкой магистров, также осуществляются курсы повышения квалификации, стажировки и переподготовка специалистов (400 часов) в области урановой геологии по очно-заочной форме с учетом дистанционных методов обучения.

Многолетний опыт работы Томского политехнического университета в области переподготовки кадров для сотрудников НАК «Казатомпром» успешно реализуется совместно с Казахским ядерным университетом шесть лет и за это время переподготовку прошли в общей сложности 140 человек, из них сотрудники различных рудников (ТОО «Каратау», ТОО «ДП Орталык», ТОО «СП Хорасан-U», ТОО «Байкен-U» ТОО «АППАК» и другие.). Сотрудничество трех организаций позволило выработать схему взаимодействия и предложить новую форму обучения, которая позволила оптимально использовать ресурс двух кафедр ТПУ, а ныне отделений – это кафедра химической технологии редких, рассеянных и радиоактивных элементов Физико-технического института (отделение ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий) и кафедра геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов (отделение геологии Инженерной школы природных ресурсов), в состав которой входит Международный инновационный научно-образовательный центр «Урановой геологии». Переподготовка сотрудников НАК «Казатомпром» ведется по трем программам: «Технология урановых добывающих и перерабатывающих предприятий», «Технология подземного выщелачивания урана» и «Геология урановых месторождений». Выбранная схема проведения занятий по модульной системе позволяет максимально учитывать возможности сотрудников предприятий, которые большую часть времени находятся на рабочих местах и слушают лекции по вебинару, т.е. имея компьютер на рабочем месте или дома с доступом к интернету. Занятия проводятся ежедневно 6 раз в неделю по 1,5 часа. Кроме этого модульная система обучения предусматривает приезд всех слушателей первый раз в г. Алматы (площади КЯУ) для прослушивания установочных лекций, а второй раз в Томск для выполнения лабораторных и практических занятий на лабораторных установках кафедр ТПУ. Занятия ведут профессионалы своего дела, которые имеют за своими плечами многолетний опыт работы в урановой отрасли (профессора: Жерин И. И., Карелин В. А., Арбузов С. И., Язиков Е. Г., доценты: Шагалов В. В., Егоров Н. Б., Кантаев А. С., Амелина Г. Н., Брылин В. И., Кузеванов К. И., Домаренко В. А. и др.).

Завершение обучения слушателей сопровождается подготовкой выпускной аттестационной работы с публичной защитой перед авторитетной аттестационной комиссией. Продолжительность обучения составляет 6 месяцев при объеме каждой программы по 400 часов. Слушатели получают диплом о профессиональной переподготовке Томского политехнического университета и имеют право на ведение нового вида деятельности. Уникальность данной переподготовки в том, что слушатели имеют возможность в течение периода обучения общаться со специалистами, решать конкретные задачи, которые могут способствовать оптимизации технологических схем добычи, извлечения и переработки урана. Слушатели выполняют работы на реальных материалах про-

изводственных предприятий, а выпускные работы имеют практическую направленность. Заложенная база в дипломных работах может реализовываться в дальнейшем в подготовке кандидатских диссертаций, хотя для этого потребуется определенная усидчивость и самоорганизация.

Многолетнее плодотворное сотрудничество Томского политехнического университета с Казахским ядерным университетом позволяет успешно решать кадровые вопросы крупнейшей компании в мире по добыче, производству и переработке урана НАК «Казатомпром». Выпускники программы повысив свой профессиональный рост и повышаются в должности. Так выпускник 2015 года Искаков Манас МЫрзашевич назначен директором производственного департамента НАК «КАЗАТОМПРОМ», а выпускник 2016 года Нетбаев Асхат Болатович назначен директором рудника «Хорасан-1» ТОО «СП «Хорасан», тогда как выпускник 2017 года Калибеков Мухтар Айдарович начначен директором рудника «Акдадала» СП «ЮГХК». В настоящее время обучение проходят специалисты 13 рудников НАК «КАЗАТОМПРОМА», в т. ч. генеральный директор ТОО «АППАК» Авдеев А. Б. и два его зам. генеральных директора Жансугуров Д. О. и Бейсенбеко А. Ж., а также начальник рудника «Канжуган» ТОО «Казатомпром Sauran» Кайратулы Е. и два зам. генеральных директора ТОО «СП «Инкай» Темирбаев С. Е. Кожамбердиев Е. М.

Литература

1. Язиков Е. Г., Рихванов Л. П. Подготовка специалистов в области урановой геологии на базе международного научно-образовательного центра Томского политехнического университета // Актуальные проблемы урановой промышленности: Сборник трудов IX Междунар. научно-практической конференции. – Алматы, 2019. – Т. 2. – С. 425–427.
2. Язиков Е. Г., Рихванов Л. П. Использование ресурсного потенциала международного научно-образовательного центра «урановая геология» для подготовки магистров профиля «геология месторождений стратегических металлов» // Современные технологии, экономика и образование: Сборник трудов Всероссийской научно-методической конференции. / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – С. 149–151.

РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В КОМПОНЕНТАХ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ И ОТХОДАХ УГЛЕ- И ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ХАКАСИИ

Е. Г. Язиков, С. В. Азарова

Томский политехнический университет
Томск, Россия, yazikoveg@tpu.ru, svetazara@tpu.ru

RADIOACTIVE ELEMENTS IN THE COMPONENTS OF NATURAL ENVIRONMENT AND IN THE WASTE OF COAL AND MINING ENTERPRISES OF KHAKASSIA

E. G. Yazikov, S. V. Azarova

Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, yazikoveg@tpu.ru, svetazara@tpu.ru

U and Th distribution is described; the effective specific activity of natural radioactive nuclides is taken into account in the material, soils and waste of AOOT Teiskoye Rudoupravleniye, OAO Sayanmramor, OAO Coal Opencast Chaplan of deposits in Khakassia.

Введение

Как известно, поступление радиоактивных элементов в окружающую среду может быть связано с природными образованиями (месторождения полезных ископаемых, горные породы). Распределение радиоактивных элементов (РАЭ) в земной коре неравномерно, чему способствует разработка месторождений открытым способом. Приводя к трансформации земной поверхности, формированию отвалов вскрышных пород, отходов обогащения (шламохранилища), золошлаковых отходов. Процессы добычи и использования угля обуславливают весомое перераспределение содержащихся в них элементов. В хозяйственной деятельности Республики Хакасии горнодобывающая промышленность занимает ве-

дущую роль. На территории Республики ведется добыча угля, золота, молибдена, барита, железа, мрамора, гранита, известняка и многих других полезных ископаемых. Горные предприятия разрабатывают месторождения, оставляя после себя горные выработки (карьеры, шахты), отвалы вскрышных и вмещающих пород, хвостохранилища, шламонакопители и ряд других техногенных объектов. Основная радиогеохимическая нагрузка, на компоненты природной среды Хакасии обусловлена круговоротом больших объемов отходов. Таким образом, изучение распределения радиоактивных элементов в компонентах природной среды и отходах горнодобывающих предприятий Хакасии представляется актуальным.

Цель: описать распределение радиоактивных элементов в почвах и отходах железорудного, угольного и камнеобрабатывающего предприятий Республики Хакасия.

Материалы и методы

В 2000 гг. сотрудниками кафедры ГЭГХ Института геологии и нефтегазового дела Томского политехнического университета были проведены эколого-геохимические исследования состава отходов и близлежащих почв, включая в набор изучаемых компонентов радионуклиды. Всего было отобрано 96 проб почв и отходов месторождений Хакасии. АООТ «Тейское рудоуправление»: породы отвалов, шлам отстойника и хвостохранилища. ОАО «Саянмрамор»: породы отвалов Кибик-Кордонсокго месторождения мраморов, Изербельского месторождения гранитов, шлам отстойника, золошлаковые отходы. ОАО «Угольный разрез Чалпан»: породы отвала, золошлаковые отходы.

Опробование производилось с использованием вариантов горстевого, точечного способов и вычерпывания. Рядом с каждым источником техногенного загрязнения были отобраны пробы почв. Для определения содержаний элементов в природных средах применялся комплекс современных методов исследования вещества в аккредитованных лабораториях Санкт-Петербурга, Новосибирска, Абакана и Томска.

Лабораторное определение U и Th производилось ядерно-физическими методами на базе исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т НИИ ядерной физики ТПУ (аналитик А. Ф. Судыко) согласно инструкции НСАМ ВИМС № 410-ЯФ. Использован традиционный метод инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА).

В ОГУ «Областной комитет охраны окружающей среды и природопользования» Администрации Томской области, лаборатории отдела радиационного контроля, г. Томск сотрудниками Ю. А. Громовым и В. Б. Елагиным был проведен гамма-спектрометрический анализ отдельных проб. Предварительно пробы были специально подготовлены в соответствии с требованиями ГОСТа 30108-94, по которому в дальнейшем анализировались полученные результаты. Данный ГОСТ устанавливает методы определения удельной активности естественных радионуклидов (А). А – отношение активности радионуклида в образце к массе образца, Бк/кг. Удельная эффективная активность естественных радионуклидов в материале, определяемая с учетом их биологического воздействия на организм человека по формуле: $A_{эфф} = A_{Ra} + 1{,}31\ A_{Th} + 0{,}085\ A_{K}$, где A_{Ra}, A_{Th}, A_{K} – удельные активности радия, тория, калия соответственно, Бк/кг. Далее, после получения величины $A_{эфф}$, в соответствии с критериями определялся класс опасности отхода (от I до IV), по которому давались рекомендации по применению исследуемых материалов.

Как известно, хранителем информации об атмосферных выпадениях, а соответственно, о рассеянных элементах, носителями основной массы которых являются аэрозоли, характеризующих современный уровень состояния атмосферного воздуха, является снежный покров. В марте 2003 года были отобраны пробы снега методом шурфа на глубину от 40 до 60 см на территории месторождения, которые были проанализированы методом ИНАА. Пробы были отобраны: фоновая – в 14 км от промзоны (1Ф), остальные: близ отвала «Южный» (2Т); рядом с хвостохранилищем ДОФ (3Т); в поселке (4Т) и на отвале «Северный» (5Т).

Результаты и их обсуждение

Тейское железорудное месторождение, на котором проявляются признаки совмещения известковых и магнезиальных скарнов, не имеют выраженного радиогеохимического облика. Хотя флюоритовая минерализация на Тейском месторождении интенсивно проявлена, но в процессе ее формирования не происходит привноса урана [2]. Ископаемые угли способны накапливать значительные количества элементов-примесей (в том числе U, Th), нередко достигающих промышленно-значимых концентраций [1].

Источниками образования отходов на руднике являются: добычные карьеры, дробильно-обогатительная фабрика и промышленно-отопительная котельная. На предприятии сформировано четыре отвала вскрышных пород («Северный», «Южный», «Южный-1» и «Южный-2») общим объемом 150 179,2 тыс. $м^3$, занимающие площадь 241,2 га; хвостохранилище, шламоотстойник, золоотвал и золоотстойник.

Руда, привозимая из карьера, проходит следующую схему отработки. Стадия дробления и грохочения включает крупное дробление, осуществляемое на двух щековых дробилках; среднее дробление в двух конусных дробилках, мелкое дробление в четырёх конусных дробилках с предварительным грохочением на грохотах ГИТ-51. Стадия обогащения – сухая магнитная сепарация осуществляется на четырёх сепараторах 2ПБС 90/250. Произведённый первич-

ный концентрат складируется на открытых прирельсовых складах. Отходы обогащения (хвосты) системой ленточных конвейеров направляются в бункер, где загружаются в автосамосвалы БелАЗ и вывозятся в отвал хвостов.

Шламы образуются при гидрообеспылевании в скрубберах, затем перекачиваются в закрытый отстойник, где отстаиваются и вымываются в шламоотстойник.

На промышленно-отопительной котельной отходами являются зола и шлак. Топочные газы, движущиеся по газоходам котельного агрегата, уносят с собой твёрдые частицы летучей золы и несгоревшего топлива. Для очистки дымовых газов от летучей золы применяются батарейные циклоны. После очистки в батарейных циклонах зола осаждается в бункере, оттуда она периодически вывозится автосамосвалами в отвал. Зола из сборных бункеров и золоуловителей, а также шлак от котлов через золосмывные аппараты поступает в каналы гидрозолоудаления. Гидрозолошлаковая смесь проходит через решётку, после чего пульпа перекачивается в отстойник на рельеф местности, а шлак по скреперному каналу поднимается в бункер, откуда вывозится автосамосвалами в отвал.

На комбинате ОАО «Саянмрамор» источниками образования отходов являются четыре отвала. На территории находятся отвалы мраморной крошки и мраморной пыли. К особенностям отвала № 1 «грязный» стоит отнести складирование золошлаковых отходов. Шлам на комбинате образуется в результате пиления и обработки камня. Золошлаковые отходы с промышленной площадки котельной периодически вывозятся на отвал № 1 «грязный».

Отвал № 1, который условно называется «грязным», содержит в своем составе вскрышные и вмещающие породы карьера, которые представлены сланцами и некондиционным мрамором. Отвал № 2, который условно называется «чистым», содержит в основном мрамор, который остается после обработки на комбинате. Из него получают мраморную крошку непосредственно на отвале.

Таблица 1. Содержание U и Th (мг/кг) в отвалах и отходах производства АООТ «Тейское рудоуправление»

Элементы	Отвалы				Шлам хвостохранилища	Шлам шламоотстойника	Золошлаковые отходы	Кларк в земной коре [4]
	«Северный»	«Южный»	«Южный-1»	«Южный-2»				
U	5,8	7,4	4,8	н.о.	19	11	9,1	2,5
Th	3,2	1,3	2,6	1,8	2,7	1,4	7,2	9,3
Th/U	0,6	0,2	0,5		0,1	0,1	0,8	3,7

н.о. – элемент не определен.

Таблица 2. Содержание U и Th (мг/кг) в отвалах и отходах производства ОАО «Саянмрамор»

Элементы	Отвалы				Шлам отстойник № 1	Мраморная крошка	Золошлаковые отходы	Кларк в земной коре [4]
	№ 1 «грязный»	№ 2 «чистый»	№ 1 гранитный	№ 2 гранитный				
U	10	5,3	4,3	6	2,5	4,1	9,2	2,5
Th	10	0,5	19	14	9,3	0,5	10	9,3
Th/U	1	0,1	4,4	2,3	3,7	0,1	1,1	3,7

Таблица 3. Содержание U и Th (мг/кг) в сортовом угле, отвалах и отходах производства ОАО «Угольный разрез Чалпан»

Элементы	Сортовой уголь				Среднее в сортовом угле местия	В каменных углях мира (Юдович Я.Э., 1985)	Породы отвала	Золошлаковые отходы	Среднее для осадочных пород (Виноградов, 1962)	Кларк в земной коре [4]
	ДПК	ДО	ДМСШ	ДР						
U	2,8	1,7	2,6	2,5	2,4	1-3	2,5	7,8	3,2	2,5
Th	н.о.	1,5	3,2	2,5	1,8	3,5	9,3	9,9	11	9,3
Th/U		0,88	1,23	1	0,75		3,7	1,3	3,4	3,7

н.о. – элемент не определен.

Таблица 4. Результаты гамма-спектрометрического анализа проб отходов

Номер пробы	Место отбора пробы	Активности обнаруженных радионуклидов (удельные), Бк/кг			А эфф. Бк/кг
		К-40	Ra-226	Th-232	
АООТ «Тейское рудоуправление»					
99111	Породы отвала «Северный»	373	21	13	70
99113	Породы отвала «Северный»	868	33	77	129
99119	Породы отвала «Южный»	231	11	З/н	31
99116	Породы отвала «Южный-1»	З/н	21	З/н	21
99114	Породы отвала «Южный-2»	720	21	10	107
99121	Шлам хвостохранилища	572	176	З/н	225
99122	Шлам хвостохранилища	334	124	13	169
9915	Шлам отстойника	426	129	13	182
ОАО «Саянмрамор»					
99515	Породы отвала № 1 «грязный»	934	126	91	329
995211	Породы отвала № 1 «гранитный»	1219	49	73	247
99524	Шлам отстойника	228	30	23	80
99529	Шлам отстойника	З/н	17	З/н	17
99543	Золошлаковые отходы	З/н	75	42	131
99519	Мраморная крошка на технологической площадке	З/н	15	3	19
ОАО «Угольный разрез Чалпан»					
99216	Породы отвала	497	32	15	94
99217	Породы отвала	522	32	17	99
99219	Породы отвала	361	25	19	81
9924	Золошлаковые отходы	168	68	58	158

З/н – значимо не отличается от фона.

Таблица 5. Результаты гамма-спектрометрического анализа проб почв

Номер пробы	Место отбора пробы	Активности обнаруженных радионуклидов (удельные), Бк/кг				А эфф. Бк/кг
		К-40	Ra-226	Th-232	Cs-137	
АООТ «Тейское рудоуправление»						
99166	Почва южной части золошлакового отвала	448	226,54	36	н.о	136
ОАО «Саянмрамор»						
995610	Почва в 60 м от отвалов №1 и №2 «гранитный»	12,64	55	232,46	99	223
ОАО «Угольный разрез Чалпан»						
9921611	Почва в 6 м от золошлакового отвала	631	28	34	16	126
99218	Почва рекультивируемого участка отвала	418	25	16	н.о.	81

н.о – не обнаружено.

Породы отвалов № 1 и № 2 «гранитный» Изербельского месторождения гранитов представлены гранитами и дайками диабазового состава.

Источниками образования отходов на предприятии ОАО «Угольный разрез Чалпан» являются добычной угольный разрез с его внешним отвалом вскрышных пород на площади 7,9 га и промышленно-отопительная котельная. На площадке дробильно-сортировочного цеха получают сортовой уголь: ДПК 50–200 мм длиннопламенный, ДО 20–50 мм длиннопламенный орешек, ДМСШ длиннопламенный мелкий семечка штиб и ДР длиннопламенный рядовой. На промышленно-отопительной котельной отходами являются зола и шлак. Золоотвал расположен на промышленной площадке размером 40 × 40 метров с небольшим количеством отходов.

Геохимический анализ отходов горнодобывающих производств свидетельствует о неоднородности химического состава изучаемого материала. Существенная концентрация отмечается для U в АООТ «Тейское рудоуправление» в породах отвалов: «Северный», «Южный», «Южный-1» и шламе хвостохранилища, шламоотстойника и золошлаковых отходах. При этом торий-урановое отношение равно 0,6, 0,2, 0,5, 0,1 0,1 и 0,8 соответственно (табл. 1). Следует отметить, что в промпродукте концентрация U – 16 мг/кг в 6,4 раза выше кларка в земной коре (2,5 мг/кг).

На рисунке 1 представлено содержание U в снеговом покрове на территории Тейского железорудного месторождения, полученные по результатам ИНАА. Из представленной диаграммы видно, что концентрация U превышает значение кларка ноосферы [3] во всех точках, кроме территории поселка.

На комбинате ОАО «Саянмрамор» для пород отвала «грязный» наблюдается превышение кларка в земной коре [4] для U в 4 раза. Для пород отвала «чистый» – в 2 раза. Для отвала мраморной крошки почти в 2 раза. Аналогичная картина и для пород отвалов Изербельского месторождения гранитов № 1 и № 2 «гранитный». Превышение кларка в земной коре для U в 1,7 и 2,4 раза. Золошлаковые отходы характеризуются превышением содержания U относительно кларка в земной коре почти в 4 раза. Величина торий-уранового отношения представлено в таблице 2.

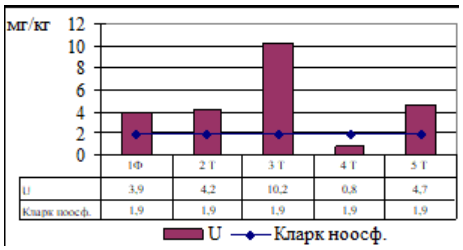


Рис. 1. Содержание U в снеговом покрове на территории Тейского железорудного месторождения

В различных сортах угля ОАО «Угольный разрез Чалпан», только лишь в угле ДПК отмечается концентрация U 2,8 мг/кг, превышающая кларк в земной коре (2,5 мг/кг). Причем это значение не превышает величины среднего значения в каменных углях мира 1–3 мг/кг [5]. Из радиоактивных элементов в породах отвала отмечаются повышенные концентрации урана – 6,8 мг/кг, относительно среднего содержания в осадочных породах (3,2 мг/кг) и кларка в земной коре (2,5 мг/кг). В отходах промышленно-отопительной котельной отмечаются превышения кларка в земной коре по U – 7,8 мг/кг (2,5 мг/кг). Величина торий-уранового отношения представлено в таблице 3.

По данным изучения проб почв гамма-спектрометрическим анализом (лаборатория ОГУ «Облкомприрода») материал исследования характеризуется низкой удельной активностью радионуклидов, материал относится к I классу согласно ГОСТ 30108-94 (табл. 4, 5).

Из приведенных материалов следует, что в основном концентрация U в отходах, горнодобывающих предприятий в превышает кларк в земной коре. В снеговом покрове территории АООТ «Тейское рудоуправление» концентрация U превышает значение кларка ноосферы. Содержание К-40, Ra-226, Th-232 в почвах и отходах месторождений Хакасии: АООТ «Тейское рудоуправление», ОАО «Саянмрамор», ОАО «Угольный разрез Чалпан» в целом на уровне кларка.

Литература

1. Арбузов С. И. Геохимия и металлоносность углей Красноярского края / С. И. Арбузов, А. В. Волостнов, В. В. Ершов, Л. П. Рихванов, В. С. Миронов, В. С. Машенькин. – Томск: Изд-во STT, 2008. – 300 с.
2. Рихванов Л. П. Радиохимическая типизация рудно-магнетических образований (на примере Алтае-Саянской складчатой области) / Л. П. Рихванов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2002. – 536 с.
3. Глазовский Н. Ф. Техногенные потоки вещества в биосфере // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. – М.: Наука, 1982. – С. 86–95.
4. Григорьев Н. А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры / Н. А. Григорьев // Геохимия, 2003. – № 7. – С. 785–792.
5. Юдович Я. Э., Кетрис М. П., Мерц А. В. Элементы-примеси в ископаемых углях / Под ред. Д. А. Минеева. – Л.: Изд-во «Наука», Ленинградское отделение, 1985. – 239 с.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДОБЫЧИ АЛМАЗОВ НА РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЭКОСИСТЕМ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ (НА ПРИМЕРЕ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ, РОССИЯ)

Е. Ю. Яковлев, А. И. Малов, С. В. Дружинин, С. Б. Зыков, А. С. Орлов

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. ЛавероваУрО РАН
Архангельск, Россия, evgeny.yakovlev@fciarctic.ru

EVALUATION OF THE IMPACT OF DIAMOND MINING ON THE RADIO-ECOLOGICAL STATE OF THE ARCTIC ZONE ECOSYSTEMS (EXAMPLE OF ARKHANGELSK REGION, RUSSIA)

E. Yu. Yakovlev, A. I. Malov, S. V. Druzhinin, S. B. Zykov, A. S. Orlov

N. Laverov Federal Centre for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences
Arkhangelsk, Russia, evgeny.yakovlev@fciarctic.ru

The article is devoted to the study of the activity of natural and technogenic radionuclides in the environment components around the Lomonosov diamond deposit. This is the largest diamond mining and beneficiation complex in Europe. Samples of river sediments and surface waters were taken from the Zolotitsa River and its tributaries in the area of the diamond deposit.The values of radiation parameters were found to be, on average, below the global average, and therefore, radiation parameters do not pose a significant hazard to the personnel and public. Several patterns of radionuclide accumulation have been found depending on the physicochemical parameters of river sediments.

Введение

Со второй половины XX века Арктическая зона России подверглась значительному воздействию техногенной радиоактивности (Айбулатов, 2000; Matishovetal., 2019). Однако вклад техногенных радионуклидов в радиацию человека и экосистем не столь велик, поскольку наибольшее влияние на облучение населения оказывают естественные источники ионизирующего излучения, присутствующие во всех природных объектах (UNSCEAR, 2008). Основными природными радионуклидами являются ^{226}Ra, ^{232}Th и ^{40}K. Основное внимание в радиоэкологических исследованиях уделяется именно этим радионуклидам.

На отдельных территориях Европейской Арктики России (Кольский полуостров) наблюдается повышенный радиационный фон, обусловленный естественными причинами – геологическим строением территории (Киселев и др., 2005). Таким образом, освоение месторождений полезных ископаемых, связанное с добычей больших объемов горных пород, приводит к выбросу в окружающую среду значительных радионуклидов естественного происхождения в концентрациях, нехарактерных для земной поверхности. В связи с этим разработка месторождений полезных ископаемых влечет за собой существенное изменение окружающей среды, в том числе ее радиоактивного состояния в пределах горных выработок. В Архангельской области породы Балтийского щита не достигают поверхности, однако на некоторых участках в породах осадочного чехла обнаруживаются повышенные концентрации естественных радионуклидов (Киселев и др., 2018). В частности, это характерно для месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова, расположенного в 90 км к северу от города Архангельска (Киселев и др., 2017).

Месторождение им. М. В. Ломоносова является крупнейшим промышленным месторождением алмазов в Европе. Месторождение было открыто сравнительно недавно в 80-е годы прошлого века, однако промышленное освоение месторождения началось только в 2005 году с разработки трубки Архангельская. Основной рекой, протекающей в районе месторождения, является р. Золотица, впадающая в Белое море. Площадь ее бассейна составляет около 2000 тыс км^2 (Беднарук, 2008). Река Золотица имеет особый природоохранный статус, поскольку является крупным в бассейне Белого моря нерестилищем сёмги – атлантического лосося (*Salmosalar*). Долина реки заселена очень слабо, в верхнем течении есть только вахтовый поселок горно-обогатительной фабрики, а в нижнем течении – несколько рыбацких деревень, использующих воды реки Золотицы для питьевых нужд (дер. Верхняя и Нижняя Золотица). Единственным техногенным объектом, который потенциально может привести к загрязнению водных экосистем р. Золотицы является горно-обогатительная фабрика. В настоящее время ведется активная разработка месторождения, сопряженная с извлечением больших объемов руды, включающая в себя полный цикл обогащения, различные мероприятия по обеспечению функционирования горно-обогатительного производства (сооружение отвалов и хвостохранилищ,

водопонижение, очистка промывных вод обогатительной фабрики, сооружение полей фильтрации) (Солдатова, 2016). В экзоконтактах глубоких горизонтов трубок месторождения им. Ломоносова были обнаружены повышенные содержания естественных радионуклидов (Киселев и др., 2017, 2018). В связи с развитием предприятия, последующим углублением карьеров, увеличением объемов добычи алмазов за счет разработки новых трубок, ростом численности населения вахтового поселка, а также в связи сособым охранным статусом реки Золотицы крайне важным является проведение радиоэкологических исследований в этой области. Кроме этого, необходимо оценить радиоэкологические риски для населения вахтового поселка и персонала обогатительной фабрики. Целью данного исследования являлись определение активностей естественных радионуклидов ^{226}Ra, ^{232}Th и ^{40}K и техногенного изотопа ^{137}Cs, оценка радиологических рисков, а также исследование физико-химических параметров речных отложений влияющих на процессы накопления радионуклидов.

Материалы и методы

Пробы донных осадков (48 проб) и поверхностных вод (11 проб) отбирались из р. Золотица и всех ее притоков в районе месторождения.Донные осадки отбирались с помощью ручного пробоотборника Петерсона. После отбора образцы донных осадков высушивали в сушильном шкафу BINDER E28 при температуре 105 °C до воздушно сухого состояния. Гранулометрический состав донных осадков определяли с помощью вибрационной просеивающей машины AS 200 control. В пробах речных отложений определяли физико-химические параметры такие как, содержание органики, водорастворимых солей, карбонатов (CO_3^{2-}) и pH водной вытяжки. Для измеренных активностей ^{226}Ra, ^{232}Th и ^{40}K были рассчитаны параметры радиационной безопасности, такие как эквивалент радия (Ra_{eq}), индекс внешний опасности (H_{ex}) и мощность поглощенной дозы гамма-излучения (D_r).

Определения радионуклидов ^{137}Cs, ^{226}Ra, ^{232}Th и ^{40}K проводили с использованием низкофонового полупроводниковогогамма-спектрометра ORTEC (США) на основе коаксильного детектора GEM10P4-70из особо чистого германия (HPGe).

Исследование изотопного состава урана после предварительной радиохимической подготовки проводили на полупроводниковом альфа-спектрометре «Прогресс» с кремниевым поверхностно-барьерным детектором площадью 400 мм^2.

Результаты и их обсуждение

В обобщенном виде результаты исследований активности радионуклидов и радиационных параметров в донных осадках р. Золотица и ее притоков показаны в таблице 1.

Средние концентрации радионуклидов убывают в порядке ^{40}K > ^{232}Th > ^{226}Ra > ^{137}Cs. Средние активности радионуклидов ^{137}Cs, ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}Кв целом для исследованных речных осадков составляют 5,4, 9,0, 11,3, 321,6 Бк/кг, соответственно. Значения активности естественных радионуклидов находятся ниже среднемировых (UNSCEAR., 2000).В донных осадках озер Архангельской области средние активности радионуклидов несколько выше и составляют для ^{137}Cs, ^{226}Ra, ^{232}Th и ^{40}K – 33, 21, 23 и 300 Бк/кг (Быков, 2018).

Индекс радиевого эквивалента (Ra_{eq}) в донных осадках р. Золотицы и ее притоков колеблется от 21 до 191 Бк/кг, при среднем значении 47,7 Бк/кг. Как можно видеть, индекс Raeq колеблется в достаточно широких приделах, однако он не превышает максимального значения 370 Бк/кг, установленного Международной организацией по ядерной энергетике. Диапазон изменений величины поглощенной зоны варьирует от 12 до 95 нГр/ч. Среднее значение DRдля речных осадков составляет 24,5 нГр/ч. Можно отметить, что средняя мощность поглощенной дозы гамма-излучения в речных осадках исследуемой территории примерно в два раза ниже, чем среднемировое значение 55 нГр/ч (UNSCEAR, 2000). Рассчитанные значения индекса Нех для речных отложений колеблются в пределах 0,06–0,54 (Tab. 1). Средняя величина Нехдля этих осадков составляет 0,13. Основная цель данного индекса заключается в том, чтобы ограничить уровень эквивалентной дозы облучения до допустимого значения 1,0 мЗв/год (International…, 1993). Для всех исследованных проб речных отложений значение внешнего индекса опасности (H_{ex}) < 1.

Изотопное отношение ^{234}U/^{238}U в поверхностных водах изменяется от 1,57 до 3,29, концентрация урана от 0,2 до 2,29 мкг/л. Общая альфа-активность проб поверхностных вод колеблется от 0,01 до 0,13 и не превышает установленных норм 0,2 Бк/л для питьевыхвод (НРБ 99/2009).

Таблица 1. Удельные активности ^{137}Cs, ^{232}Th, ^{226}Ra, ^{40}K, а также параметры радиационной безопасности р. Золотица и ее притоков

Sample No	^{137}Cs (Бк/кг)	^{226}Ra (Бк/кг)	^{232}Th (Бк/кг)	^{40}K (Бк/кг)	Ra_{eq} (Бк/кг)	Dose rate (нГр/ч)	H_{ex}
Min	0,8	1,9	0,0	175,0	21	12	0,06
Max	18,4	37,0	59,0	999,0	191	95	0,54
Average	5,4	9,0	11,3	321,6	47,7	24,5	0,13

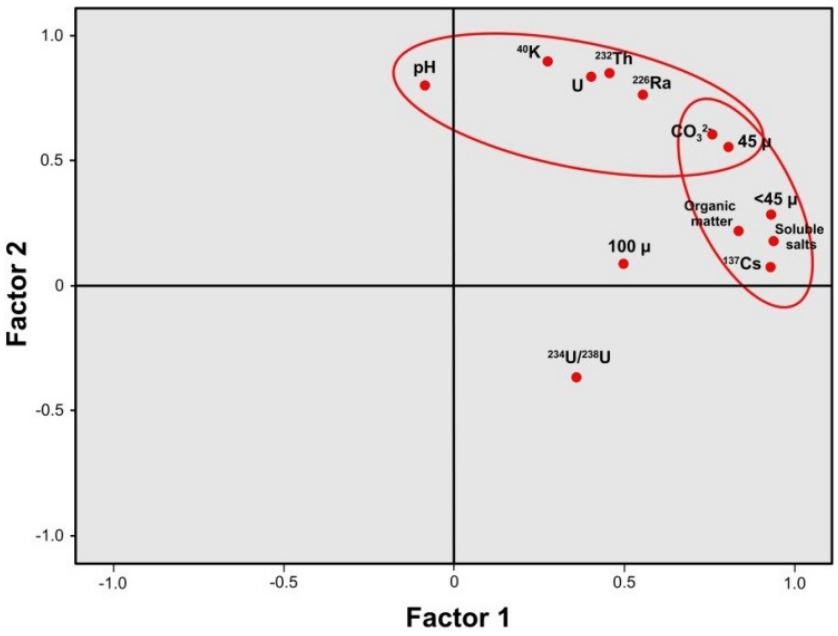


Рис. 1. Диаграмма факторных нагрузок для донных осадков р. Золотица

Для исследования особенностей накопления радионуклидов в речных отложениях р. Золотицы и ее притоков было выполнено изучение гранулометрического состава и физико-химических параметров речных отложений. Анализ полученных данных выполнен на основе методов статистики (факторный анализ). Надиаграмме факторных нагрузок набор данных разделяется на две группы факторов (Рис. 1).

В фактор 1 по положительным нагрузкам объединяются фракции осадков размером 45 µ и < 45 µ, ^{137}Cs, ^{226}Ra, органическое вещество, CO_3^{2-} и водорастворимые соли. Пространственный анализ содержания мелкой фракции с размером частиц < 45 µ, органики, карбонатов и водорастворимых солей в донных осадках р. Золотицы показал, что максимальные средние значения этих параметров приурочены к участку реки, в районе которого в русло Золотицы происходит разгрузка дренажных вод из болот-полей фильтрации. Разгрузка на этом участке минерализованных дренажных вод, содержащих значительные количества глинистых частиц, приводит к увеличению в донных осадках доли глинистой составляющей, карбонатов, водорастворимых солей и естественных радионуклидов. Фильтрация дренажных вод через болотный массив также приводит к увеличению массовой доли органического вещества в донных осадках, источником которого являются органические соединения торфа. Это в свою очередь приводит к увеличению в донных осадках активности техногенного ^{137}Cs, поскольку органические комплексы торфяных залежей фиксируют радионуклиды атмосферных выпадений. На других участках русла р. Золотицы наблюдается приуроченность повышенных значений глинистой составляющей, содержания органики, карбонатов и водорастворимых солей к устьевым участкам притоков. Во второй фактор объединяются фракция речных отложений размером 45 µ, U, ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K, CO_3^{2-} и pH. По-видимому, фактор 2, контролирующий присутствие в донных осадках р. Золотицы U, ^{232}Th, ^{40}K и большей части ^{226}Ra, представляет собой минеральную литогенную частью донных осадков, с которой преимущественно связаны данные радионуклиды.

Заключение

Выполнены исследования активности естественных радионуклидов ^{226}Ra, ^{232}Th и ^{40}K, а также техногенного ^{137}Cs в донных осадках р. Золотицы и ее притоков в районе разрабатываемого месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова (Северо-Запад России). Выполнены исследования изотопного состава урана в пробах поверхностных вод изр. Золотицы и ее притоков для оценки радиационного качества речных вод. Максимальные средние значения физико-химических параметров и радионуклидов приурочены к участку р. Золотицы, в районе которого в русло реки происходит разгрузка дренажных вод из болот-полей фильтрации. Разгрузка на этом участке минерализованных дренажных вод, содержащих повышенные количества глинистых частиц, приводит к увеличению в донных осадках доли глинистой составляющей, карбонатов, водорастворимых солей и естественных радионуклидов. Фильтрация дренажных вод через болотный массив также приводит к увеличению массовой доли органического вещества в донных осадках, источником которого являются органические соединения торфа. Это в свою очередь приводит к увеличению в донных осадках активности техногенного ^{137}Cs.

Рассчитаны параметры радиационной безопасности донных отложений. Средняя мощностьпоглощенной дозы гамма-излучения D_R речных осадков составила 24,5 нГр/ч. Эквивалент радия Ra_{eq} для донных осадков составляет в среднем 47,7 Бк/кг. Рассчитанный индекс внешней опасности H_{ex} для речных отложений не превышает 1. Это говорит о том, что величина дозы облучения находится на уровне ниже допустимого значения 1 мЗв/год (International…, 1993). Общая альфа-активность в воде не превышает установленных значения 0,2 Бк/лдля питьевыхвод (NRB 99/2009). Значения радиационных параметров в среднем находятся на уровне ниже среднемировых величин и не представляют существенной опасности для персонала ГОКа и населения вахтового поселка. Можно сделать вывод, что в настоящий момент в районе месторождения наблюдается относительно низкий уровень естественной радиоактивности.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-1919.2020.5, а также грантов РФФИ № 20-35-70060 и 18-05-60151.

Литература

1. Айбулатов Н. А. Экологическое эхо холодной войны в морях Российской Арктики / Н. А. Айбулатов. – Москва: ГЕОС, 2000. – 307 с.
2. Беднарук С. Е. Гидрографическое районирование территории Российской Федерации / С. Е. Беднарук. – Москва: НИА-Природа, 2008. – 541 с.
3. Быков В. М. Закономерности формирования радиоизотопного состава в донных отложениях озер Европейского Севера России / В. М. Быков. – Архангельск: САФУ, 2018. – 112 с.
4. Киселев Г. П. Естественная радиоактивность Европейского Севера и ее антропогенные изменения / Г. П. Киселев, В. В. Кряучюнас, И. М. Киселева, С. Б. Зыков, А. В. Баженов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2005. – № 3. – С. 205–218.
5. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).
6. Солдатова О. А. Оценка влияния сброса дренажных вод с разработки алмазного месторождениям. Ломоносова на р. Золотица / О. А. Солдатова. – Санкт-Петербург: РГГУ, 2016. – 50 с.
7. International Commission on radiological protection. Protection against radon-222 at home and at work, ICRP Publication 65, Ann. ICRP, 1993, 23 (2), 1–45.
8. Kiselev G. P. Distribution of radioactive isotopes in rock and ore of Arkhangelskaya pipe from the Arkhangelsk diamond province / G. P. Kiselev, E. Yu. Yakovlev, S. V. Druzhinin, A. S. Galkin // Geol. Ore Deposits, 2017. – № 5 (59). – P. 391þ406.
9. Kiselev G. P. Uranium even isotopes in kimberlites, enclosing and overburden rocks of the Zolotitskoye ore field (Arkhangelsk diamondiferous province) / G. P. Kiselev, E. Yu. Yakovlev, S. V. Druzhinin, S. B. Zykov, V. M. Bykov, A. A. Ocheretenko // Russ J Earth Sci., 2018. – № 18–3. – P. ES3002.
10. Matishov G. G. Technogenic radioactivity in the waters of the central polar basin and adjacent Arctic waters / G. G. Matishov, N. E. Kasatkina, I. S. Usyagina // DokladyAkademiinauk, 2019. – № 1. – P. 93–98.
11. UNSCEAR, 2000. Sourcesandeffectsofionizingradiation. UnitedNations, NewYork: ReporttotheGeneralAssemblywithAnnexes.

ОЦЕНКА УРОВНЯ ПРОДУЦИРОВАНИЯ РАДОНА В РАЙОНАХ РАЗВИТИЯ КИМБЕРЛИТОВОГО МАГМАТИЗМА (НА ПРИМЕРЕ АРХАНГЕЛЬСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ)

Е. Ю. Яковлев, А. В. Пучков

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова УрО РАН
Архангельск, Россия, evgeny.yakovlev@fciarctic.ru, andrey.puchkov@fciarctic.ru

ASSESSMENT OF THE RADON PRODUCTION RATE IN AREAS OF DEVELOPMENT OF KIMBERLITE MAGMATISM (ON THE EXAMPLE OF ARKHANGELSK DIAMOND PROVINCE)

E. Yu. Yakovlev, A. V. Puchkov

N. Laverov Federal Centre for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences
Arkhangelsk, Russia, andrey.puchkov@fciarctic.ru, andrey.puchkov@fciarctic.ru

In this scientific work, we carried out experimental work to assess the radon production rate in kimberlites and host deposits of the Lomonosov diamond deposit in the Arkhangelsk diamond province. We have shown that the radon production rate is the main radiation parameter characterizing the radon field above kimberlite pipes. To assess the radon field, additionally, we determined the following parameters: porosity, the activity of radium-226, the volumetric activity of radon in a free state, and the coefficient of emanation. The research results showed that the largest amount of "free" radon is produced by rocks of the near-pipe space, which are the host deposits of Vendian V2 and are additionally characterized by high values of the emanation coefficient and radium activity. The research results confirm the prospects of using emanation methods in the search and localization of kimberlite pipes.

Введение

Радон входит в цепочку радиоактивного семейства урана-238 и непрерывно образуется во всех природных средах при радиоактивном распаде его материнского изотопа радия-226, период полураспада которого составляет около 1600 лет [1]. Являясь инертным газом с относительно большим периодом полураспада (3,82 дней), по своим физическим и химическим свойствам выступает оптимальным индикатором для изучения многих процессов, происходящих в окружающей среде [2], в том числе и в геологической [3]. Связано это с тем, что радон в свободном состоянии за счет эманирования горных пород проявляет способность легко мигрировать в геологической среде в газовой фазе или растворенным в поровых водах [4], формируя радоновое поле с проявлением эманационных аномалий в приповерхностных горизонтах горных пород, грунтов и почв [5]. Данные факты обусловили возможность применения эманационных методов при геохимических, геофизических и геодинамических исследованиях [1], в том числе и при поисках месторождений полезных ископаемых (например, кимберлитов) [6]. По результатам радоновых исследований на территории Архангельской алмазоносной провинциинаблюдаются повышенные значения объемной активности радона, превышающие в несколько раз фоновые значения. При этом распределение радона над кимберлитовыми трубками имеет околотрубочный характер [7].

Для того, чтобы понять механизм формирования околотрубочного распределения радонового поля, а также с целью дальнейшего развития эманационных методов поисков кимберлитов, нами проведены детальные исследования радиационных и физических параметров горных пород, формирующих кимберлитовое тело. Целью данного исследования являлось изучение уровня продуцирования радона горных пород, слагающих кимберлитовые трубки Архангельской алмазоносной провинции. Для этого были изучены радиационные и физические параметры кимберлитов, перекрывающих и вмещающих горных пород Золотицкого кимберлитового поля Архангельской алмазоносной провинции.

Материалы и методы

Отбор проб горных пород проводился в карьерах кимберлитовых трубок месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова. В общей сложности отобрано 30 проб горных пород массой до 2 кг каждая, представленных различными типами отложений, вскрытых карьерами до глубины 186 метров (сверху вниз) перекрывающие четвертичные (Q) и каменноугольные породы (C2), вмещающие породы венда (V2), туфогенно-осадочные породы кратера (iD3-C2) и кимберлиты жерловой фации (iD3-C2). Подробное

описание геологического строения месторождения М. В. Ломоносова представлено в работе [8]. После доставки в лабораторию пробы горных пород высушивали в сушильном шкафу BINDER E28 при температуре 105 °С до воздушно сухого состояния. Определение радиационных и физических параметров горных пород проводили в лаборатории экологической радиологии, аккредитованной в национальной системе аккредитации на соответствие требованиями ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 в области проведения радиационных измерений. Основнымиметодамиисследованияврамкахэкспериментаявляютсяследующие:

- гамма-спектрометрический с применением низкофонового полупроводникового гамма-спектрометра ORTEC (США) на основе коаксиального детектора GEM10P4-70 из особо чистого германия (HPGe) с цифровым анализатором DSPEC LF и программным обеспечением MAESTRO-32 и GAMMA-VISION-32;
- радиометрический (эманационный) с применением комплекса по мониторингу за радоном«Альфарад Плюс – АР» (Россия).
- вспомогательные средства измерения и оборудование для определения физических параметров проб: пористость и плотность.

Метод гамма-спектрометрии широко применяется для регистрации гамма-излучения радионуклидов естественного происхождения, включая и радий-226, потому как является универсальным, неразрушающим и простым в применении методом, особенно на стадиях подготовки проб и процесса измерения (IAEA, 2010, Syam, 2020).Для определения в горных породах радионуклида радий-226 применяли полупроводниковый гамма-спектрометрический комплекс с азотным охлаждением ORTEC с детектором GEM 10 P4-70 (Ametek Ortec, США) в комплекте со свинцовой защитой. Разрешение гамма-спектрометра по линии 1,33 МэВ (^{60}Co) составляет 1,75 кэВ, относительная эффективность – 15 %. Геометрия измерения – сосуд Маринелли объемом 1 литр (счетный образец).

Определение объемной активности радона проводили с применением комплекса измерительный для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс» (ООО НПП «Доза», Россия). Геометрия измерения – пластиковый баллон объемом 5 литр (счетный образец). Данный параметр определялся в контейнере объемом 5 л, в который загружался образец породы, после чего контейнер тщательно герметизировался.

По результатам эксперимента определили коэффициент эманирования ^{222}Rn (его свободное состояние) по следующей формуле:

$$K_{Rn} = \left(1 - \frac{A_{Ra226}\,(\text{неравновесная})}{A_{Ra226}\,(\text{равновесная})}\right) \bullet 100,=$$

где: A_{Ra226} (неравновесная) – удельная активность ^{226}Ra (в неравновесном состоянии), определенная как среднее значение результатов первого и последнего измерений (негерметизированных), Бк/кг; A_{Ra226} (равновесная) – удельная активность ^{226}Ra (в равновесном состоянии), определенная как среднее значение результатов последних 5 измерений в герметизированном состоянии, Бк/кг.

Уровень продуцирования радона в единице объема, P (Бк/(м3 • ч)), рассчитывали по следующей формуле [9]:

$$P = \lambda\, K_{Rn}\, A_{Ra226}\, \rho_b,$$

где: λ – постоянная распада радона ($2{,}1 \bullet 10^{-6}$ $с^{-1}$); ρ_b – средняя плотность, кг/м^3.

Определение параметров пористости, средней (объемной) и истинной плотности отобранных образцов проводили согласно нижеприведенным методам, основанным в том числе на работе [9].

Результаты и их обсуждение

Уровень продуцирования радона является одним из важнейших для количественной оценки радона в его свободном состоянии [9]. Результаты определения данного параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1. Уровень продуцирования радона в горных породах

Уровень продуцирования радона, Бк/(м^3 • ч), диапазон/среднее значение	
Перекрывающие породы	38,88–59,12
	52,47
Кимберлиты жерла	9,84–18,96
	16,15
Вмещающие породы	37,19–132,03
	63,88
Туфогенно-осадочные породы кратера	33,97–139,57
	75,39

Наиболее высокие уровни продуцирования радона отмечены во вмещаюших и туфогенно-осадочных породах. Подобная картина наблюдается и по другим радиационным и физическим параметрам, представленным в таблице 2, в которой использованы следующие обозначения: A_{Ra226} – удельная активность радия-226 в условиях герметизации; $K_{emanation}$ – коэффициент эманации; AV_{dens} – средняя плотность; TR_{dens} – истинная плотность; Porosity – пористость.

Учитывая высокие значения удельной активности радия, коэффициента эманирования, уровня продуцирования радона и пористости, вмещающие породы околотрубочного пространства выделяются среди остальных типов пород, что связано с их структурно-геологическими особенностями, характеризующимися системами радиальных и концентриче-

Таблица 2. Радиационные и физические характеристики горных пород

	Радиационные и физические характеристики, диапазон/среднее значение				
	A_{Ra226}	$K_{emanation}$	AV_{dens}	TR_{dens}	Porosity
Перекрывающие породы	15,88–30,21	11,09–24,91	1,83–2,03	2,38–2,94	18,47–32,65
	22,19	17,41	1,93	2,54	23,77
Кимберлиты	12,42–31,46	1,76–10,67	1,74–2,35	1,83–2,37	0,46–4,92
	17,59	7,14	2,06	2,11	2,39
Вмещающие породы	16,05–63,32	6,19–29,13	1,47–2,19	2,06–2,7	4,72–40,96
	35,52	13,94	1,89	2,42	21,11
Туфогенно-осадочные породы	11,45–48,4	9,82–34,13	1,36–1,90	2,12–2,54	13,21–36,74
	28,81	22,34	1,73	2,28	24,04

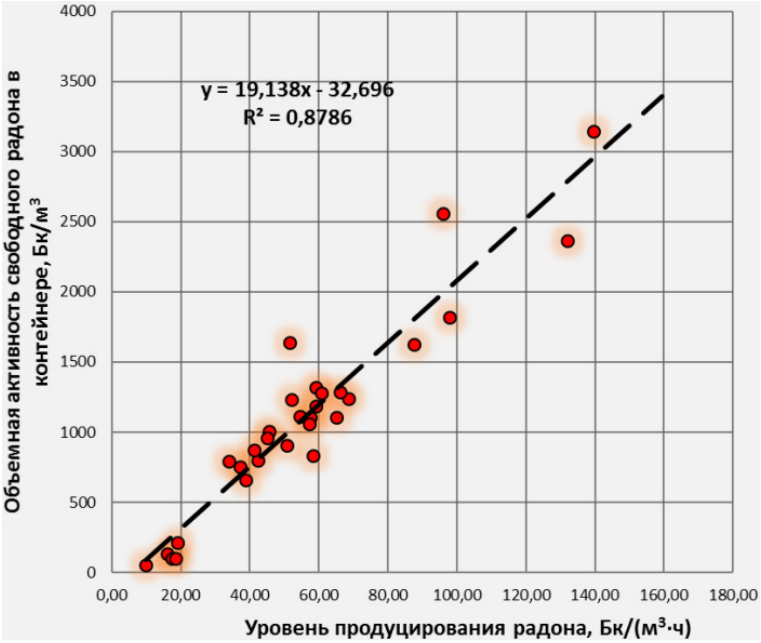


Рис. 1. Регрессионная зависимость объемной активности радона в свободном состоянии в контейнере от уровня продуцирования радона

ских зон трещиноватости и разломов с дроблением и вертикальным перемещением блоков вмещающих пород. Воздействие кимберлитов на вмещающие породы венда, приведшее к формированию в околотрубочном пространстве зон разломов, повышенной трещиноватости, различных минералогических и геохимических изменений, оказало влияние на радиационные параметры вмещающей среды. Обогащение ураном (радием) и повышенная трещиноватость околотрубоного пространства создают условия для продуцирования и переноса радона через массив вмещающих пород. В результате этого в почвенных горизонтах над кимберлитовыми телами месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова может наблюдаться повышенная объемная активность радона, в несколько раз превышающая фоновые значения [10]. В ходе данного исследования нами было установлено, что основным источником радона, наблюдаемого в почвенном воздухе над кимберлитовыми трубками являются вмещающие вендские породы околотрубочного пространства.

По результатам измерения объемной активности радона в герметизированном контейнере и расчета уровня продуцирования радона нами была построена регрессионная зависимость данных двух параметров (рисунок 1).

Коэффициент детерминации показывает, что изменение объемной активности радона в контейнере (зависимая переменная) на 87,9 % описывается независимой переменной (регрессором) – уровнем продуцирования радона. Данная модель более наглядно прогнозирует распределение радона исходя из результатов расчета уровня продуцирования радона.

Заключение

В данной работе нами проведены экспериментальные исследования по оценке уровня продуцирования радона и других основных радиационных и физических факторов, влияющих на формирование радонового поля над кимберлитовыми трубками Архангельской алмазоносной провинции. Для этого были отобраны пробы кимберлитов и горных пород из карьеров трубок Архангельская и Карпинского-1 месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова. Отобранные образцы представлены основными типами горных пород, вскрытых карьерами до глубины 186 метров: перекрывающие четвертичные (Q) и каменноугольные породы (C2), вмещающие породы венда (V2), туфогенно-осадочные породы кратера (iD3-C2), и кимберлиты жерловой фации (iD3-C2).

Установлено, что кимберлиты жерловой фации характеризуются среди изученных типов пород наиболее низкими значениями коэффициента эманирования, уровнем пористости, удельной активности радия-226, а также уровнем продуцирования радона. Наиболее низкие значения этих параметров ограничивают образование свободного радона в теле трубки.

Результаты исследований показали, что наибольшее количество радона в свободном состоянии продуцируют горные породы околотрубочного пространства, представленные вмещающими отложениями венда V2 и характеризующиеся высокими значениями коэффициента эманирования, удельной активности радия, уровня продуцирования радона, и пористости.

Исходя из представленных данных основным источником радона, наблюдаемого в почвенном воздухе над кимберлитовыми трубками, являются вмещающие вендские породы околотрубочного пространства (*near-pipe space*). Результаты проведенных работ являются шагом к развитию эманационных методов поисков кимберлитовых трубок на территории Архангельской алмазоносной провинции.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-35-70060 «Исследование условий продуцирования повышенных концентраций радона в осадочном чехле областей развития кимберлитового магматизма (на примере Архангельской алмазоносной провинции)»

Литература

1. Baskaran M. Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies / M. Baskaran, 2016. – 464 p.
2. Selvam S. Quantification of submarine groundwater discharge (SGD) using radon, radium tracers and nutrient inputs in Punnakayal, south coast of India / S. Selvam, P. Muthukumar, S. Sajeev, S. Venkatramanan, S. Y. Chung, K. Brindha, D. S. S. Babu, R. Murugan // Geosci. Front, 2021. – № 12.
3. Kawabata K. Changes in groundwater radon concentrations caused by the 2016 Kumamoto earthquake / K. Kawabata, T. Sato, H.A. Takahashi, F. Tsunomori, T. Hosono, M. Takahashi, Y. Kitamura // J. Hydrol, 2020. – № 584.
4. Moreno V. Characterization of radon levels in soil and groundwater in the North Maladeta Fault area (Central Pyrenees) and their effects on indoor radon concentration in a thermal spa // J. Bach, M. Zarroca, L. Font, C. Roqué, R. Linares // J. Environ. Radioact., 2018. – № 189.
5. Микляев П. С. Исследования эманирования глинистых пород по радону / П. С. Микляев, Т. Б. Петрова // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2010. – № 1. – С. 13–22.
6. Kiselev G. P. Uranium even isotopes in kimberlites, enclosing and overburden rocks of the Zolotitskoye ore field (Arkhangelsk diamondiferous province) / G. P. Kiselev, E. Y. Yakovlev, S. V. Druzhinin, S. B. Zykov, V. M. Bykov, A. A. Ocheretenko // Russ. J. Earth Sci., 2018. – № 18.
7. Kiselev G. P. Radiometric and seismic study of Chidvinskaya kimberlite pipe (Arkhangelsk diamondiferous province, North of the East European Craton, Russia) / G. P. Kiselev, K. B. Danilov, E. U. Yakovlev, S. V. Druzhinin // Geofísica Int., 2017. – № 2. – P. 147–155.
8. Yakovlev E. Y. Features of radioactive element distribution within the Arkhangelsk diamondiferous province: possible directions for development of isotope–radiogeochemical methods for kimberlite prospecting in complex landscape-geology and climate conditions of the suba / E. Y. Yakovlev // Geochemistry Explor. Environ. Anal., 2020. – № 20.– P. 269–279.
9. Pereira A. Estimation of the radon production rate in granite rocks and evaluation of the implications for geogenic radon potential maps: A case study in Central Portugal / A. Pereira, R. Lamas, M. Miranda, F. Domingos, L. Neves, N. Ferreira, L. Costa // J. Environ. Radioact., 2017. – № 166.
10. Киселев Г. П. Радиометрические и сейсмометрические исследования кимберлитовой трубки Чидвинская (Архангельская алмазоносная провинция) / Г. П. Киселев, К. Б. Данилов, Е. Ю. Яковлев, С. В. Дружинин // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2016. – № 1. – Выпуск № 30. – С. 43–53.

СОВРЕМЕННОЕ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ УСТЬЕВОЙ ЧАСТИ РЕКИ ПЕЧОРА

Е. Ю. Яковлев, А. В. Пучков

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова УрО РАН
Архангельск, Россия, evgeny.yakovlev@fciarctic.ru, andrey.puchkov@fciarctic.ru

THE CURRENT RADIOECOLOGICAL STATE OF THE MOUTH OF THE PECHOR RIVER

E.Yu. Yakovlev, A. V. Puchkov

N. Laverov Federal Centre for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences
Arkhangelsk, Russia, andrey.puchkov@fciarctic.ru, andrey.puchkov@fciarctic.ru

In this scientific work, we carried out studies of the spatial distribution of natural and technogenic radionuclides in bottom sediments, surface waters, soil, and peat in the mouth of the Pechora River. The relevance of such studies is associated with the presence of a large number of sources of potential radiation hazards in the region. We have found that the average activity of radionuclide radium-226 in bottom sediments of the Pechora River delta is 2 times higher than in other rivers of the Arctic basin of the European part of Russia. Perhaps this fact is associated with oil and gas activities, which are intensively developing in the Pechora River basin since radionuclides of the radioactive uranium chain enter the surface together with oil waters. We have not found any artificial radionuclides in bottom sediments, with the exception of isolated cases of the presence of cesium-137 with an activity of no more than 2.2 Bq/kg. Surface waters are characterized by low values of radiation parameters. We were able to determine only the total activity of beta-emitting radionuclides. The rest of the radiation parameters turned out to be below the sensitivity threshold of the radiometric equipment. Soils, peat and vegetation in the Pechora River basin contain both natural and artificial radionuclides. We found radioactive cesium-137 with an activity of up to 50 Bq/kg, strontium-90 – up to 21 Bq/kg, americium-241 – up to 1 Bq/kg, which is associated with global radioactive fallout, as well as radiation incidents in the past. The level of natural radionuclides does not differ in increased values, with the exception of individual samples characterized by an increased level of lead-210 – 440 Bq/kg.

Введение

Река Печора является крупнейшей арктической рекой в пределах Европейской части России. Она берет свое начало на Северном Урале и впадает в Печорское море. Река Печора имеет большое экономическое и транспортное значение для нескольких регионов России – в бассейне реки расположены крупные горнодобывающие и нефтеперерабатывающие предприятия, ведется добыча нефти, пригодного газа, каменного угля, добыча, переработка и сплав древесины [1]. Наибольший интерес с точки зрения оценки степени совокупного антропогенного воздействия на Печорский бассейн представляет дельта реки Печоры, которая является особым природным биогеохимическим объектом на границе река-море и способная аккумулировать различные виды загрязнений [2]. И важнейшим значением для оценки экологического состояния данной территории является изучение радиоактивности. Это связано с тем, что арктические территории с момента начала атомной эры, подверглись существенному воздействию техногенной радиоактивности, имевшему глобальные и локальные источники: глобальные радиационные выпадения, локальные выпадения после испытаний на архипелаге Новая Земля, последствия ядерных и радиационных аварий, деятельность зарубежных радиохимических заводов, предприятия атомного судостроения и судоремонта [3–6].

Помимо техногенной радиоактивности, потенциальная опасность радиационного загрязнения также может исходить от естественных радионуклидов, связанных с наличием в Печорском бассейне многочисленных месторождений углеводородов [7]. Как правило, залежи нефти и газа содержат высокие концентрации радионуклидов уранового и ториевого рядов (^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{222}Rn, ^{210}Po, ^{210}Pb), а также калий-40. На поверхность естественные радионуклиды поступают в составе минерализованных попутных вод, составляющих значительный объем отходов в процессе добычи нефти и газа [4].

Другими источниками радиоактивности, которые потенциально могут представлять радиационную угрозу на территории Печорского бассейна являются отдельные объекты ядерного наследия. Так, в дельте реки Печора в 1981 году был проведен подземный ядерный взрыв «Пирит» мощностью 37,6 кт для остановки процесса неконтролируемого фонтанирования газа из скважины К-9 Кумжинского газоконденсатного месторождения в дельте реки Печора [8]. Однако полностью аварию ликвидировать не удалось, месторождение было законсервировано и в

настоящее время не эксплуатируется [8]. Существуют мнения о вероятности выхода продуктов ядерного взрыва на поверхность в результате вертикальной миграции по системам разломов и трещин [8]. Также в настоящее время разрабатывается проект, предусматривающий в ближайшие годы начала добычи газоконденсата на Кумжинском месторождении в дельте Печоры, что в свою очередь может спровоцировать выход на поверхность техногенных радионуклидов из эпицентра взрыва в составе добываемых углеводородов и попутных вод [8].

Таким образом, несмотря на наличие в регионе значительного количества потенциально опасных радиационных факторов в настоящее время нет актуальных данных об уровнях активности техногенных и естественных радионуклидов в экосистемах Печорского бассейна и в особенности дельты реки Печора, крупнейшей арктической реки Европейской части России. В связи с этим, целью данной работы является оценка текущего уровня естественной и техногенной радиоактивности природной среды дельты реки Печоры на основе исследования радионуклидов ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{241}Am, ^{226}Ra, ^{232}Th и ^{40}K, а также общей альфа- и бета-активности донных осадках, поверхностных водах, почве, торфе и растительности.

Материалы и методы

Отбор проб донных осадков и поверхностных вод проводился на всей территории дельты реки Печора в пределах основных протоков. Почвы отобраны в северной части дельты реки, торф – на территориях Малоземельской и Большеземельской тундры. Отбор проб растительности проводили в местах отбора проб почвы и торфа.

В общей сложности было отобрано 86 проб донных отложений, 28 проб поверхностных вод, 12 проб почвы по 4 профилям, 6 проб торфа по 2 профилям. Донные отложения отбирались с помощью оцинкованного ручного пробоотборника Ван-Вина. После доставки в лабораторию пробы донных отложений, почвы, торфа высушивали в сушильном шкафу BINDER E28 при температуре 105 °C до воздушно сухого состояния. В лабораторных условиях пробы воды упаривали до сухого остатка и переносили в измерительную кювету. Пробы растительности высушивали в естественных условиях и озоляли при температуре не более 400 °C. Аналитические исследования проводили в лаборатории экологической радиологии ФИЦКИА УрО РАН (г. Архангельск), аккредитованной в национальной системе аккредитации на соответствие требованиям ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2019 в области радиационных измерений.

Определение радионуклидов ^{137}Cs, ^{241}Am, ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K проводили с применением низкофонового полупроводникового гамма-спектрометра ORTEC (США) на основе коаксиального детектора GEM10P4-70 из особо чистого германия (HPGe) с цифровым анализатором DSPEC LF и программным обеспечением MAESTRO-32 и GAMMA-VISION-32.

Параметры суммарной удельной (объемной) активности по альфа- и бета-излучениям определялись с применением альфа-бета-радиометра РКС-01 «Абелия» (НТЦ Амплитуда, Россия).В данной работе понятиясуммарной удельной (объемной) активности по альфа- или бета-излучениям включает в себя активность всех альфа- или бета-излучающих радионуклидов в конкретной пробе в единице массы (объема).

Определение радионуклида ^{90}Sr проводилось по его дочернему продукту распада – ^{90}Y. Методика радиохимического выделения ^{90}Y основана на осаждении оксалатов ^{90}Sr и кальция в условиях кислой среды, дополнительной очистке стронция, накопления и выделения дочернего ^{90}Y в виде гидроокислов на первом этапе, а далее выделения ^{90}Y в виде оксалата и измерения его активности по бета-излучению.

Результаты и их обсуждение

В обобщенном виде результаты исследований радиационных параметров в донных осадках дельты р. Печора показаны в таблице 1. Пространственное распределение радионуклидов приведено на рисунках 1–5.

В пространственном распределении ^{226}Ra (рисунок 1) по площади дельты наблюдается некоторая зональность: активность ^{226}Ra в донных осадках увеличивается с запада на восток и с юга на север, что вероятно связано с особенностями распределе-

Таблица 1. Удельные активности ^{137}Cs, ^{232}Th, ^{226}Ra, ^{40}K, а также суммарные удельные активности по альфа-, бета-излучению в донных отложениях реки Печора

Радионуклид	Удельная активность, Бк/кг		
	Минимальная	Максимальная	Средняя
Альфа-активность	25,75	380,0	169,22
Бета-активность	120,73	813,85	512,72
Cs-137	< 0,1	2,2	0,16
Ra-226	5,2	38,4	18,72
Th-232	< 0,1	34,0	13,36
K-40	99,0	580,0	373,59

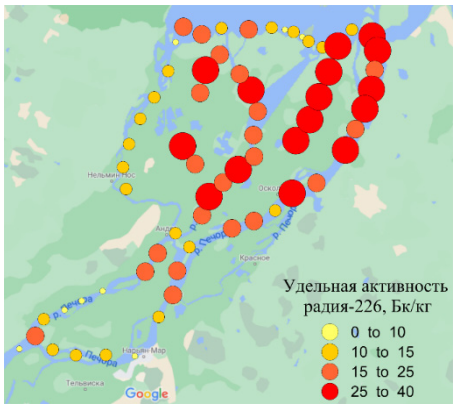


Рис. 1. Радий-226 в донных отложениях устьевой части реки Печора

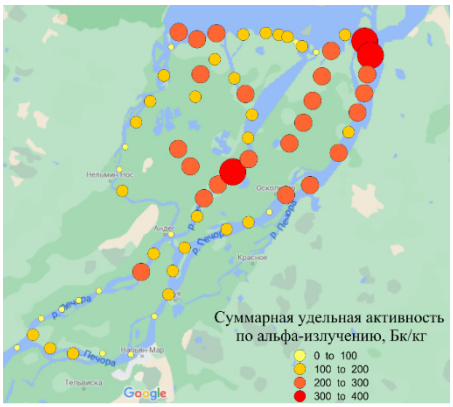


Рис. 2. Суммарная удельная активность по альфа-излучению в донных отложениях устьевой части реки Печора

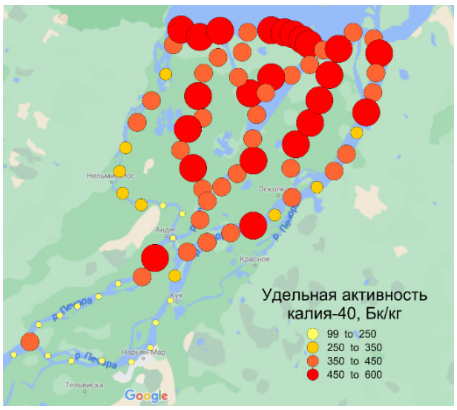


Рис. 3. Калий-40 в донных отложениях устьевой части реки Печора

Рис. 4. Суммарная удельная активность по бета-излучению в донных отложениях устьевой части реки Печора

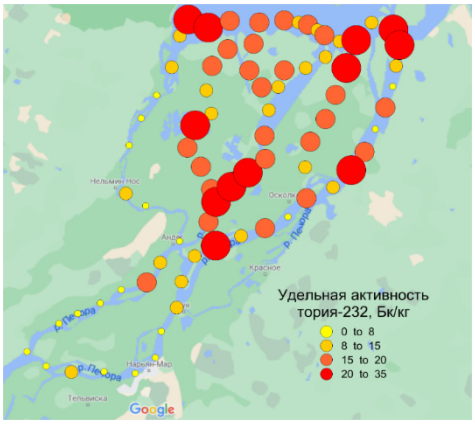


Рис. 5. Торий-232 в донных отложениях устьевой части реки Печора

ния мелкодисперсного обломочного материала на разных участках дельты. Однако в целом средняя активность ^{226}Ra в осадках дельты Печоры в 2 раза выше чем, в дельте другой крупной арктической реки Северной Двины, где активность ^{226}Ra, полученная на основе исследования 160 проб, составила 9,7 Бк/кг [9].

Наиболее высокие активности ^{232}Th (рисунок 5) наблюдаются в восточной и северной частях дельты, что в целом схоже с картиной распределения ^{226}Ra и может быть связано с распределением мелкодисперсных осадков. Наиболее низкие значения ^{40}K (рисунок 3) наблюдаются в южной и западной частях дельты. При продвижении с севера на юг происходит увеличение активности ^{40}K, достигая максимальных значений на северном фронте дельты, в зоне впадения вод р. Печора в Коровинскую губу. Пространственное распределение суммарных альфа и бета активностей (рисунки 2, 4) имеет схожие черты с распределением отдельных радионуклидов ^{232}Th, ^{226}Ra и ^{40}K, что говорит о том, что данные радионуклиды и многочисленные дочерние продукты их распада (^{228}Ra, ^{228}Ac, ^{228}Th, ^{212}Pb, ^{210}Pb, ^{210}Bi, ^{210}Po et al.) вносят основной вклад в общую радиоактивность донных отложений дельты р. Печора.

Значения радионуклидов ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K, а также общей альфа-активности в поверхностных водах дельты р. Печора оказались ниже предела обнаружения радиометрической и спектрометрической аппаратуры. В измеряемых количествах удалось определить лишь суммарную объемную активность

Рис. 6. План-схема отбора проб торфа, почвы и растительности в местах разрезов

бета-излучающих радионуклидов. Однако полученные значения данного параметра в воде дельты р. Печоры являются крайне низкими и находятся в диапазоне от 19,6 до 59,6 Бк/м^3.

Кроме проб донных отложений и воды, в отдельных точках был проведен отбор проб почвы, торфа, а также растительности в местах почвенных и торфяных разрезов. План-схема с указанием объема отобранного материала указана на рисунке 6.

Отобранные пробы почвы, торфа и растительности характеризуются наличием таких радионуклидов как ^{137}Cs с активностью до 71 Бк/кг, ^{90}Sr с активностью до 21 Бк/кг, ^{40}K с активностью до 470 Бк/кг, ^{210}Pb с активностью до 440 Бк/кг. В отдельных пробах почвы и торфа наблюдается незначительное присутствие искусственного радионуклида ^{241}Am с активностью не более 2 Бк/кг (пробы торфа Пт-1, Пт-2 и проба почвы Пп-3). Удельная активность отдельных альфа-излучающих радионуклидов ^{226}Ra и ^{232}Th в основном характеризуется низкими значениями, кроме пробы Пп-4 (Ауд. по ^{226}Ra – 11,3 Бк/кг в среднем слое и 12,5 Бк/кг в нижнем слое; Ауд. по ^{232}Th – 19 Бк/кг в верхнем слое, 14,2 Бк/кг в среднем слое и 20,4 Бк/кг в нижнем слое). Интересным фактом оказалось отсутствие зависимости между параметром суммарной удельной активности по альфа-излучению и альфа-излучающими радионуклидами ^{226}Ra и ^{232}Th. Отсюда можно сделать вывод о разнохарактерном механизме накопления и миграции как материнских изотопов радия и тория, так и их многочисленных продуктов распада.

Заключение

В целом результаты проведенных исследований показали, что в настоящее время в районе дельты р. Печоры наблюдается относительно низкий уровень естественной и техногенной радиоактивности. Незначительное превышение активности ^{226}Ra по сравнению с другими реками Северо-Западного арктического региона может быть связано с интенсивной эксплуатацией нефтегазовых месторождений, локализованных в бассейне реки Печора. Отмечается отсутствие искусственных радионуклидов в донных отложениях и поверхностных водах реки, несмотря на наличие объектов «ядерного наследия» в регионе. Наличие искусственных радионуклидов в незначительных количествах в почве, торфе и растительности обусловлено глобальными радиационными выпадениями, а также испытаниями на архипелаге Новая Земля.

Проведенные исследования являются исходным материалом в серии комплексных исследований современного радиоэкологического состояния тундровых территорий Европейской части России.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента МК-1919.2020.5 «Оценка последствий совокупного влияния горнотехнической деятельности и климатических изменений на водные ресурсы арктической зоны Российской Федерации (на примере Архангельской и Мурманской областей)».

Литература

1. Кривов В. Д. Современное состояние и перспективы социально-экономического развития Ненецкого автономного округа. Аналитический вестник / В. Д. Кривов, К. В. Шкред, А. Г. Саркисов, Т. А. Штукина, Д. Г. Владимиров, В. Е. Данилова, И. В. Макаренкова – № 1 (744) – Аналитическое управление аппарата Совета Федерации, 2020. – 81 с.
2. Скибинский Л. Э. Современное гидрохимическое состояние прибрежных и устьевых акваторий Белого и Печорского морей: автореф. дис. … канд. географ. Наук. – Москва, 2003 – 28 с.
3. UNSCEAR, 2000. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations, NewYork: Report to the General Assembly with Annexes.
4. AMAP Assessment 2015: Radioactivity in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway.
5. Chen J. Activity concentration measurements of selected radionuclides in seals from Canadian Arctic / J. Chen, W. Zhang, B. Sadi, X. Wang, D. C. G. Muir // Journal of Environmental Radioactivity, 2017. – № 169–170. – P. 48–55.
6. Matishov G. G. Technogenic Radioactivity of Waters in the Central Arctic Basin and Adjacent Water Areas / G. G. Matishov, N. E. Kasatkina, I. S. Usyagina // Doklady Earth Sciences, 2019. – № 485. – P. 288–292.
7. Kontorovich A. E. Geology and hydrocarbon resources of the continental shelf in Russian Arctic seas and the prospects of their development / A. E. Kontorovich, M. I. Epov, L. M. Burshtein, V. D. Kaminskii, A. R. Kurchikov, N. A. Malyshev, O. M. Prischepa, A. F.Safronov, A.V.Stupakova, O. I. Suprunenko // Russian Geology and Geophysics, 2010. – № 51 (1). – P. 7–17.
8. Богоявленский В. И. Катастрофа на Кумжинском газоконденсатном месторождении: причины, результаты, пути устранения последствий / В. И. Богоявленский, С. О. Перекалин, В. М. Бойчук, И. В. Богоявленский // Арктика: экология и экономика, 2017. – № 1 (25). – С. 32–46.
9. Киселев Г. П. Радиоактивность донных осадков маргинального фильтра Северной Двины и Белого моря / Г. П. Киселев, А. В. Баженов, И. М. Киселева, С. В. Дружинин // Система Белого моря / Российская академия наук, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН. – Москва : Научный мир, 2017. – С. 720–735.

РАДИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Е. Ю. Яковлев, С. В. Дружинин, А. С. Дружинина, С. Б. Зыков

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Российской академии наук
Архангельск, Россия, evgeny.yakovlev@fciarctic.ru

RADIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF WATER RESOURCES OF THE KOLA PENINSULA

E. Yu. Yakovlev, S. V. Druzhinin, A. S. Druzhinina, S. B. Zykov

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Arkhangelsk, Russia, evgeny.yakovlev@fciarctic.ru

The water resources of the Murmansk region are influenced by the mining and processing industries. In this work, the physicochemical characteristics of the waters of the Kola Peninsula have been studied and water bodies with high pH, low Eh, and salinity have been noted. Evaluation of the radioactivity of the investigated reservoirs made it possible to detect waters with a high concentration of uranium (31.5 mg • l^{-1}). The study of the total α-activity showed that 87 % of water bodies have values below the intervention level. As a result, it can be concluded that the radiation situation in the Murmansk region is satisfactory.

Введение

Мурманская область является частью арктического региона России (Кольский полуостров) и обладает огромным и разнообразным природно-ресурсным потенциалом. Кольский полуостров хорошо обеспечен водными ресурсами. Экологическая ситуация в округе формируется под влиянием фактора воздействия предприятий горнодобывающей, горно-

обрабатывающей и металлургической промышленности на окружающую среду, являющийся основой экономики области.

Радиоактивность, присутствующая в поверхностных континентальных водах, в основном связана с присутствием радиоактивных элементов в земной коре [7]. Кроме того, человеческая деятельность (горнодобывающая, фрезерная и переработка урановых руд и минеральных песков, производство и использование удобрений, сжигание ископаемого топлива, очистка металлов и т. д.) повысили концентрации радионуклидов в окружающей среде [2, 7]. Как правило, поверхностные воды содержат относительно меньшее количество радиоактивных веществ (членов радиоактивных рядов U-238 и Th-232) относительно грунтовых вод.

В северных районах радиоактивность воды озер близка к активности воды рек. На радиоактивность природных поверхностных вод Кольского полуострова влияют такие факторы как ландшафтная зона, состав водовмещающих пород, взаимосвязь водоносных горизонтов между собой, тектоническое строение осадочного чехла и кристаллического фундамента, интенсивность и состав атмосферных выпадений и уровень антропогенного воздействия. Необходимо отметить, что Мурманская область подвержена потенциальной опасности радиоактивного загрязнения. На территории области находится более 200 ядерных реакторов, четыре из которых принадлежат Кольской атомной станции, значительное количество отработанного ядерного топлива, твердых и жидких радиоактивных отходов. Кроме того радиоактивность, присутствующая в поверхностных водах, в основном связана с присутствием в горных породах радиоактивных элементов, которые высвобождаются при добыче и переработки руд [7].

Радиоактивные вещества, попадающие в организм человека, продолжают излучать множество лучей в организме, вызывая внутреннее излучение [4]. Уран является генотоксическим канцерогеном и может вызывать мутации клеток [5]. Длительное воздействие урана в питьевой воде может вызвать токсическое воздействие на почки и привести к раку [3].

Анализ и систематизация опубликованных научных материалов по радиологической характеристикт природных вод на территории Кольского полуострова позволяет сделать выводы о низкой изученности данного вопроса. Таким образом, актуальным является современная радиологическая оценка водных экосистем Мурманской области.

Рис. 1. Схема точек отбора пробприродных вод Кольского полуострова

Материалы и методы

Район исследований расположен в северо-западной европейской части России (Мурманская области, рис. 1). Водные объекты, в которых производился отбор проб, относятся к бассейнам Белого и Баренцева морей (табл. 1). В число этих водных объектов входят 18 водотоков (река, канал или ручей) и 5 озер. Отбор проб производился в июле 2020 года.

Измерения показаний pH, Eh (окислительно-восстановительного потенциала), минерализации проводили непосредственно в воде исследуемых объектов согласно руководствам по эксплуатации применяемых измерительных приборов. Анализ pH, Eh проводили портативным многопараметровым pH/ОВП-метром HI 9126 (pH/ORP/T) (США, HannaInstruments) со сменным электродом для измерения pH и ОВП, измерение минерализации и температуры воды проводили кондуктометром МАРК-603/1 (Россия, «ВЗОР»).

Отбор проб воды для уран-изотопного анализа проводили в пластиковые канистры и бочки объемом 20–25 л, далее в полевых условиях из воды при pH 4 на активированный уголь осаждался уран, который отфильтровывался и доставлялся в лабораторию. Для исследований суммарной альфа-активности проводили отбор проб воды в емкости из полимерного материала объемом 5 л, консервацию проводили азотной кислотой до pH < 1.

Определение урана проводилось по методике [11]. В результате проведения радиохимической подготовки изотопы урана в виде тонкой пленки осаждаются на стальную подложку. Подложка помещалась в измерительную камеру альфа-спектрометра «Прогресс-альфа» (Россия, НПП Доза) и альфа-спектрометра полупроводникового «МУЛЬТИРАД-АС» (Россия, НТЦ Амплитуда). Подготовка счетных образцов для измерения суммарной альфа-активности проводилась по методике [12]. Измерение суммарной альфа-активности проводилось на полупроводниковом альфа-спектрометре «Мультирад-АС» (Россия, НТЦ Амплитуда) и альфа-бета радиометре «Абелия» (Россия, НТЦ Амплитуда).

Таблица 1. Наименование точек отбора проб и физико-химические свойства вод Кольского полуострова

Sample	Название водного объекта	pH	Eh	Минерализация
МК-1	р. Тутсайоки	7,12	–6,4	14,6 ± 0,2
МК-5	р. Каменная	6,86	8,4	9,4 ± 0,2
МК-10	Кандалакшскийзалив	7,36	–20,20	485,8 ± 8,0
МК-11	р. Варзуга	7,29	–17,4	29,8 ± 0,5
МК-13	Белоеморе	8,04	–60,20	424,0 ± 7,2
МК-17	р. Хлебная	7,34	–20,6	19,6 ± 0,3
МК-23	оз. Колвицкое	7,26	–15,1	17,1 ± 0,3
МК-29	Канал Кольской АЭС	7,24	–13,6	41,3 ± 0,6
МК-33	руч. Безымянный	7,71	–41,1	737,0 ± 11,0
МК-36	р. Ковдора	7,83	–68,4	91,6 ± 1,4
МК-39	руч. Безымянный	6,86	8,6	10,7 ± 0,2
МК-42	р. Лопарская	9,41	–134,5	238,0 ± 4,0
МК-45	р. Юкспорйок	9,60	–126,1	160,0 ± 2,0
МК-46	оз. Большой Вудъявр	9,97	–189,9	84,1 ± 1,3
МК-55	р. Белая	8,55	–89,8	90,2 ± 1,4
МК-75	оз. Безымянное	9,51	–146,6	3323,0 ± 50,0
МК-85	оз. Безымянное	7,96	–56,7	284,0 ± 4,0
МК-95	руч. Холодный	7,65	–32,9	13,2 ± 0,2
МК-100	р. Вирма	6,84	10,3	28,0 ± 0,4
МК-105	оз. Безымянное	8,40	–81,3	395,0 ± 6,0
МК-127	р. Кола	6,76	13,8	26,6 ± 0,4
МК-128	р. Тулома	7,45	–27,4	319,0 ± 5,0
МК-129	Кольский залив	7,24	–14,80	4506,0 ± 61,0

Результаты и их обсуждение

Физико-химическая характеристика (pH, Eh, минерализация) природных вод исследуемых водоемов Кольского полуострова представлены в таблице 1. Значения pH воды для исследуемой территории варьируются от 6,76 до 9,97 единиц, притом по рекомендации ВОЗ для питьевой воды значения pH должны находиться в пределах 6,5–8,5 единиц, что позволяет сделать вывод о проблеме защелачивания водоемов Мурманской области. Повышенные значения pH характерны для рек и озер, подверженных влиянию сточных вод с горно-перерабатывающих комбинатов и разрабатываемых рудников. Ранее было отмечено, что вблизи горно-металлургического комбината «Печенганикель» наблюдается рост значений pH озерных вод на 0,5–1,0 единиц [10], что обусловлено накоплением породообразующих макроэлементов, содержащихся в выбросах комбината.

Значения окислительно-восстановительного потенциала в исследуемых поверхностных водах варьируется от –189,9 мВ до 13,8 мВ, следовательно, в основном, в исследуемых водах происходят как восстановительные процессы. Обычно восстановительная среда (Eh < 0) в природных условиях наблюдается для грунтовых вод за счет присутствия сероводорода и металлов с низкой валентностью (Fe^{2+}, Mn^{2+}, Mo^{4+}, V^{4+}, U^{4+}).

Минерализация природных вод Кольского полуострова варьируется в широких пределах от 9,4 мг/л до 4506,0 мг/л. Высокие значения минерализации для МК-10, МК-13 и МК-129 обусловлены смешиванием пресной и морской воды, но повышенная минерализация для некоторых водоемов (МК-33, МК-42, МК-45, МК-75, МК-85, МК-105 и МК-128) объясняется воздействием сточных вод с комбинатов и рудников. По литературным данным, в нескольких озерах, расположенных в районе деятельности комбинатов «Североникель», «Апатит», «Ковдорский ГОК» и испытывающих влияние сточных вод, общая минерализация в зависимости от сезона изменяется в пределах 23,2–2650,9 мг/л [9].

Радиоактивность природного урана обусловлена в основном изотопами ^{238}U и его дочерним нуклидом ^{234}U [6]. В равновесии в образцах пород удельные активности ^{234}U и ^{238}U равны, однако, переход урана в жидкую фазу из минералов часто сопровождается нарушением равновесия и обогащением жидкой фазы изотопом ^{234}U. Это объясняется менее прочной связью атомов ^{234}U со структурой минералов и более легкой диффузией на поверхность минеральных зерен и трещин, с которой атомы ^{234}U легче выщелачиваются в раствор [2]. В исследуемых водоемах соотношение $^{234}U/^{238}U$ варьируется не значительно в интервале от 1,05 до 3,40 со средним значением 1,91 (рис. 2а). Максимальное значение наблюдается для точки МК-36 (р. Ковдора), тогда как минимальное значение определено для точки МК-46 (оз. Большой Вудъявр). Вариации значений соотношения изотопов, вероятно, связаны с различием залегающих пород. Так, максимальное значение соотношения изотопов в р. Ковдора можно объяснить сливанием рудниковых вод с Ковдорского месторождения, содержанием урана в залегающей породе преиму-

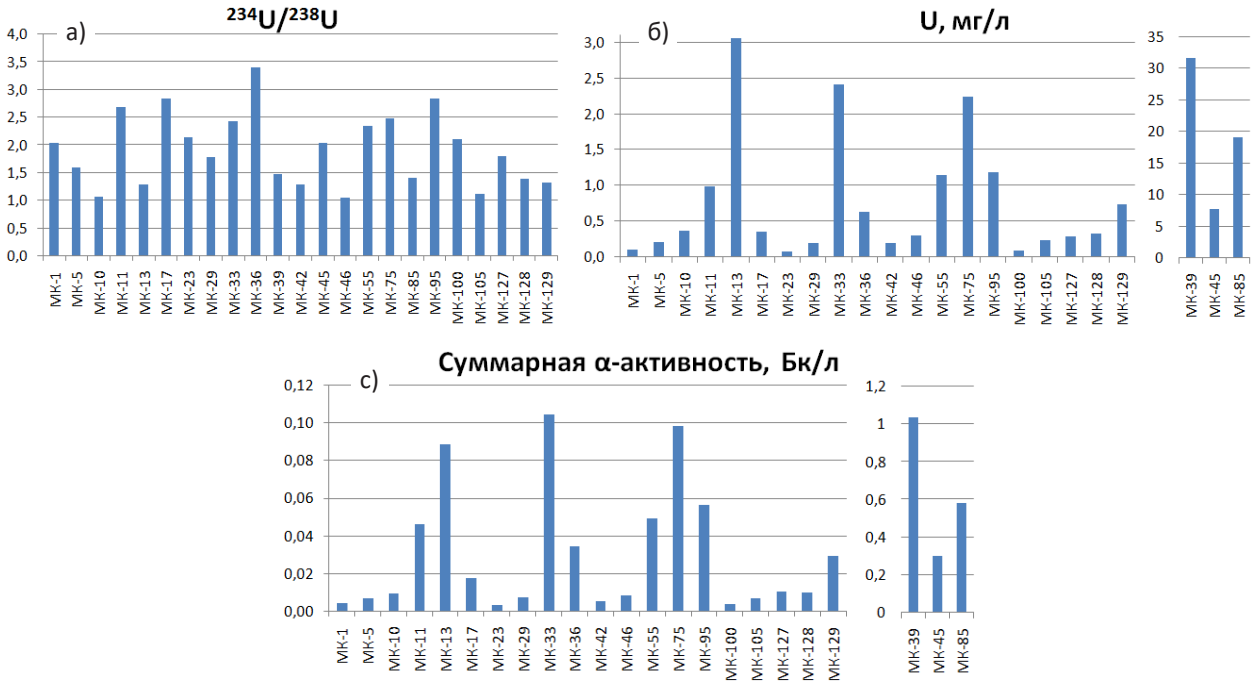


Рис. 2. Радиоэкологическая характеристика водных ресурсов Кольского полуострова: a) соотношение активностей изотопов урана ^{234}U и ^{238}U; b) суммарная концентрация изотопов урана; c) суммарная α-активность исследуемых вод

щественно в более дисперсном состоянии, а также вливанием грунтовых вод. По литературным данным средние значения коэффициента активности между ^{234}U и ^{238}U находятся в диапазоне от 1,00 до 2,14 для речной воды, от 0,51 до 9,02 для подземных вод и от 1,11 до 5,14 для морской воды [2].

По результатам проведенных исследований можно отметить высокие концентрации урана в пробах МК-39 (31,5 мг/л), МК-85 (19,1 мг/л) и МК-45 (7,7 мг/л) (рисунок 2b). Средняя концентрация урана для исследуемых водоемов составляла 3,2 мг/л. Радионуклидный уран может растворяться из почв и минеральных отложений в воде, в результате чего образуются районы с повышенным уровнем радионуклидов в природных водах [3]. Проба МК-39 представляет собой родниковую воду и, вероятно, экстремально высокое содержание урана связано с длительностью контакта воды с горными породами, а также процессами выщелачивания. Точка отбора МК-85 является озером вдоль отвалов Оленегорского горно-обогатительного комбината, повышенное содержание урана в озере вероятно связано с его выщелачиванием из горных пород, извлекаемых при добыче железорудного сырья. Необходимо отметить, что ориентировочное значение общего содержания урана в питьевой воде составляет 0,03 мг/л, исходя из его химической токсичности, которая преобладает по сравнению с его радиологической токсичностью [8, 6].

Предварительная оценка качества питьевой воды по показателям радиационной безопасности может быть дана по удельной суммарной α-активности. Альфа-активность в основном обусловлена изотопами урана (^{234}U, ^{235}U и ^{238}U) и ^{226}Ra [1]. Данный показатель в исследуемых водоемах Кольского полуострова варьируется в пределах 0,003–1,035 Бк/л со средним значением 0,109 Бк/л (рис. 2c). Наибольшее значение α-активности обнаружено в пробе МК-39. Определенный, согласно ВОЗ [8], уровень вмешательства для суммарной α-активности составляет 0,1 Бк/кг, следовательно, 83 % апробированных водоемов характеризуются значениями α-активности ниже уровня вмешательства. Исходя из приведенных данных, характеризующих радиационные параметры поверхностных вод исследуемых районов Кольского полуострова, нужно констатировать, что радиационная обстановка в исследуемом районе удовлетворительная.

Заключение

В результате исследований изучена физико-химическая характеристика природных вод Кольского полуострова и отмечены водоемы с экстремально высоким (до 9,97 ед.) водородным показателем, с низкими значениями окислительно-восстановительных потенциалов вод (до –189,9 мВ), а также с высокой минерализацией (до 3323 мг/л), что является следствием добычи и обогащения полезных ископаемых. Проведена оценка радиоактивности природных вод Кольского полуострова, в результате которой обнаружены воды с высокой концентрацией суммарного урана (31,5 мг/л), что, вероятно, связано с длительностью контакта воды с горными породами и процессами выщелачивания. Изучение суммарной α-активности позволило выявить, что 87 % апробированных водоемов характеризуются значениями данного показателя ниже уровня вмешательства. Исходя из приведенных данных можно сделать вывод, что радиационная обстановка в исследуемом районе удовлетворительная.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых МК-1919.2020.5 и гранта Российского научного фонда № 20-77-10057.

Литература

1. Bonotto D. M. The natural radioactivity in water by gross alpha and gross beta measurement / D. M. Bonotto, T. O. Bueno, B. W. Tessari, A. Silva // Radiation Measurements, 2009. – V. 44. – P. 92–101.
2. Borylo A. Activity disequilibrium between ^{234}U and ^{238}U isotopes in natural environment / A. Borylo, B. Skwarzec // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014. – V. 300 (2). – P. 719–727.
3. Guogang J. Estimation of radiation doses to members of the public in Italy from intakes of some important naturally occuring radionuclides (^{238}U, ^{234}U, ^{235}U, ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{224}Ra and ^{210}Po) in Drinking Water / J. Guogang, T. Giancarlo // Applied Radiation and Isotopes, 2007. – V. 65. – P. 849–857.
4. He L. Health risk assessment of heavy metals in surface water near a uranium tailing pond in Jiangxi Province, South China / L. He, B. Gao, X. Luo, J. Jiao, H. Qin, C. Zhang et al. // Sustainability, 2018. – V. 10 (4). – P. 1113.
5. Hu B. Assessment of radioactive materials and heavy metals in the surface soil around uranium mining area of Tongliao, China / B. Hu, C. Wang, X. Xu, S. Zhang, S. Bao, Y. Li // Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016. – V. 130. – P. 185–192.
6. Nuccetelli C. Radioactivity in drinking water: regulations, monitoring results and radiation protection issues // C. Nuccetelli, R. Rusconi, M. Forte // Annalidell'IstitutoSuperiore di Sanita, 2012. – V. 48 (4). – P. 362–373.
7. Pujol L. Natural and artificial radioactivity in surface waters of the Ebro river basin (Northeast Spain) / L. Pujol, J. A. Sanchez-Cabeza // Journal of Environmental Radioactivity, 2000. – V. 51. – P. 181–210.

8. WHO. Guidelines for Drinking-water Quality, fourth ed. incorporating the first addendum. – Geneva, 2017.
9. Даувальтер В. А. Гидрохимия озер в зоне влияния стоков производства железорудного сырья // Вестник МГТУ, 2019. – № 22 (1). – С. 167–176.
10. Даувальтер В. А. Аккумуляция и миграция химических элементов в арктических наземных и водных экосистемах в зоне влияния выбросов комбината «Печенганикель» / В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин // Труды карельского научного центра РАН, 2018. – № 3. – С. 31–42.
11. Методика измерений объемной активности изотопов урана (^{238}U, ^{234}U, ^{235}U) в пробах природных (пресных и минерализованных), технологических и сточных вод альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой. – ФГБУ «ВИМС», Москва, 2013.
12. Методика радиационного контроля «Суммарная альфа-, бета- активность природных вод (пресных и минерализованных). Подготовка проб и выполнение измерений. – ФГБУ «ВИМС», Москва, 2010.

НАКОПЛЕНИЕ И МИГРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ АТМОСФЕРНЫХ ВЫПАДЕНИЙ В ТОРФЯНО-БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ СУБАРКТИКИ РОССИИ

Е. Ю. Яковлев[1], А. А. Очеретенко[1], С. В. Дружинин[1], А. С. Дружинина[1], Р. К. Спиров[2], Е. В. Мищенко[2], Е. В. Жуковская[2]

[1]Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук Архангельск, Россия, evgeny.yakovlev@fciarctic.ru1, pieepl@ya.ru2, druzhininserg@yandex.ru3,xumuk271@mail.ru4
[2]Государственное научное учреждение «Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси» Гомель, Белоруссия, ruslan.spirov@yandex.ru5,. egor.mishchenko@yandex.ru6, zhukovskaya.evgenia@yandex.by7

ACCUMULATION AND MIGRATION OF RADIONUCLIDES OF ATMOSPHERIC DEPOSITSIN THE PEAT-BOG ECOSYSTEMS OF THE EUROPEAN SUBARCTIC OF RUSSIA

E. U. Yakovlev[1], A. A. Ocheretenko[1], S. V. Druzhinin[1], A. S. Druzhinina[1], R. K. Spirov[2], E. V. Mishchenko[2], E. V. Zhukovskaya[2]

[1]N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research (FCIArctic) Arkhangelsk, Russia, evgeny.yakovlev@fciarctic.ru1, pieepl@ya.ru2, druzhininserg@yandex.ru3,xumuk271@mail.ru4
[2]State Scientific Institution «Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus» Gomel, Belarusruslan.spirov@yandex.ru5,.egor.mishchenko@yandex.ru6, zhukovskaya.evgenia@yandex.by7

The results of studies of the activity of radionuclides of atmospheric fallout in peat-bog ecosystems of the European subarctic of Russia are presented. In the two peat cores of the Arkhangelsk region, for the first time, ^{239,240}Pu, ^{238,234}U, ^{137}Cs, ^{241}Am were determined. Radionuclide activity concentrations were measured using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), low-background semiconductor gamma spectrometry with HPGe high-purity germanium detector, and alpha spectrometry. Calculation of atomic ratio ^{240}Pu/^{239}Pu showed that sources of pollution in the peatlands of the European subarctic of Russia are global fallout from atmospheric tests of 1950–1960 and fallout from the Chernobyl accident.

Введение

В пределах северных территорий одними из основных биогеоценозов являются торфяно-болотные экосистемы. Преимущественный тип здесь – омбротрофные болота, основным источником питания которых являются аэрозоли, воздушная пыль и атмосферные осадки, что приводит к формированию бедной питательными веществами среды, на которой преобладают сфагнумы. Сфагновые растения поглощают и удерживают значительное количество радионуклидов, поступивших из радиоактивного осадка. Поэтому торфяно-болотные экосистемы стали основным концентратором радиационного загрязнения техногенными радионуклидами [13]. Несмотря на большой интерес среди исследователей к изучению радионуклидов атмосферных выпадений в торфяниках Центральной и Северной Европы [11, 13], для Европейской субарктики России до сих пор нет данных об уровнях загрязнения техногенны-

ми радионуклидами торфяно-болотных экосистем. Оценка текущих уровней активности радионуклидов является актуальной задачей.

Материалы и методы

Торфяные колонки отобраны в 2018 г. в двух районах Архангельской области. Первая торфяная колонка ТВ-1 была отобрана в Мезенском районе (Черноозерская площадь N 65,64409° E 41,35796°), вторая колонка Td-1 была отобрана в Приморском районе (рядом с посёлком Рикасиха N 64,51892° E 40,06229°).

Определение изотопов ^{239,240}Pu, ^{234,238}U, ^{137}Cs и ^{241}Am

Радиохимическую подготовку для определения ^{239,240}Pu осуществляли согласно [3]. Итоговый раствор плутония переводили в 1 % раствор HNO_3 и измеряли на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ICP Q-MS) Elan DRC-e, производства PerkinElmer. Для изотопов ^{234,238}U радиохимическую подготовку осуществляли согласно [2]. Растворенные соли, содержащие изотопы урана, подвергали электролизу. Электролиз проводили на диски из нержавеющей стали в течение 30 мин при постоянном токе 2 А [2]. Измерения полученных счётных образцов выполняли на альфа-спектрометре с полупроводниковым кремниевым детектором «Прогресс» и «Мультирад-АС» (НПП Доза, Россия). Радиохимическую подготовку для определения ^{137}Cs и ^{241}Am осуществляли согласно [1]. Измерения проводили на низкофоновом гамма-спектрометре производства CANBERRA Packard (США) с коаксиальным полупроводниковым детектором GX2018 на основе кристалла Ge(Li) и программным обеспечением Genie-2000. Геометрия измерения – плоский сосуд объемом 0,1 литр. Экспозиция 18000 с.

Результаты и их обсуждение

Вертикальное распределение радионуклидов по торфяным колонкам показано на рис. 1 и 2. Активность ^{137}Cs рассчитанная на сухую массу в колонках ТВ-1 и Td-1 варьировала от 1,07 ± 0,37 Бк/кг до 45,92 ± 4,25 Бк/кг и от < 0,01 Бк/кг до 126,08 ± 7,8 Бк/кг, соответственно. Наибольшая активность ^{137}Cs в разрезах ТВ-1 и Td-1 характерна до глубины 14–16 см. Максимум ^{137}Cs в разрезе ТВ-1 находится на глубине 6–8 см, в разрезе Td-1 максимум отмечается в самом верхнем горизонте 0–2 см. Наибольшее удержание ^{137}Cs в верхних горизонтах торфяных профилей является характерным для торфяников [13]. Из-за химического сродства между Cs и K радиоцезий транспортируется вверх по керну торфа корнями растений [10]. Высокая подвижность ^{137}Cs в верховых

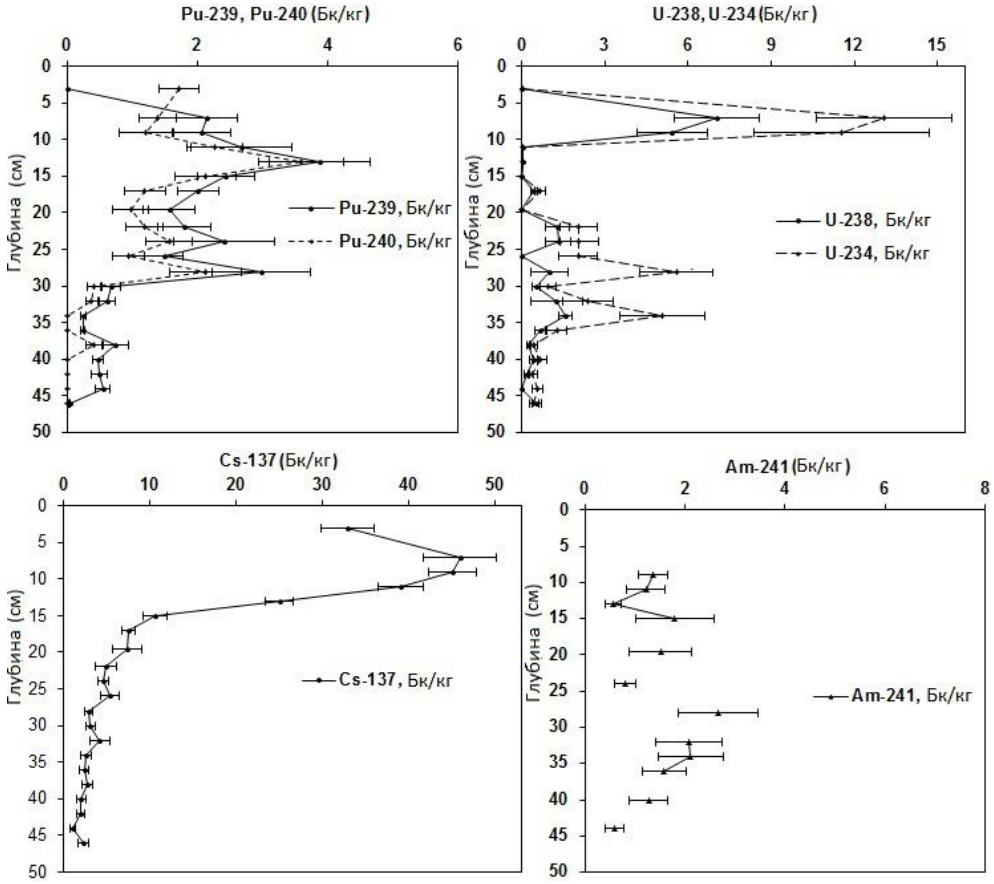


Рис. 1. Вертикальное распределение активности ^{239,240}Pu, ^{238,234}U, ^{137}Cs, ^{241}Am по торфяной колонке ТВ-1

сфагновых болотах обусловлена отсутствием подходящих минеральных частиц для его адсорбции [5, 11, 12]. Из-за различных механизмов миграции ^{137}Cs в торфяном массиве, в профилях ТВ-1 и Td-1 мы не наблюдаем четко выраженных пиков активности ^{137}Cs, поступившего от испытаний 1950–1960 годов и чернобыльского инцидента.

Максимальная активность ^{239}Pu и ^{240}Pu в профиле ТВ-1 составляла 3,88±0,78 Бк • кг$^{-1}$ и 3,59±0,65 Бк • кг$^{-1}$, соответственно и находилась на глубине 13 см. Второй максимум ^{239}Pu и ^{240}Pu наблюдался на глубине 28 см и составлял 2,98±0,75 Бк • кг$^{-1}$ и 2,12±0,55 Бк • кг$^{-1}$, соотвественно. Наибольшая активность изотопов плутония ^{239}Pu и ^{240}Pu в профиле Td-1 составляла 12,17±2,07 Бк • кг$^{-1}$ и 10,10±1,82 Бк • кг$^{-1}$, соответственно и находилась на глубине 9 см. Другой максимум ^{239}Pu и ^{240}Pu наблюдался на глубине 39 см, менее выраженный пик активности Pu есть на глубине 30–32 см. Как можно видеть на рис. 1 и 2 для торфяных профилей ТВ-1 и Td-1 характерно различное положение пиков.

Наличие двух выраженных пиков активностей ^{239}Pu и ^{240}Pu в обоих торфяных разрезах, вероятно, свидетельствует о наличии двух источников Pu в торфяниках Архангельской области. Пики Pu в разрезах ТВ-1 и Td-1 на глубинах 9–13 см, вероятно, связаны с аварией на Чернобыльской АЭС, а более глубокие 28–39 см возможно связаны с глобальными выпадениями в результате атмосферных испытаний до 1963 года. По данным ряда авторов глобальные выпадения происходили и в период после 1963 до 1980 года [4]. Для идентификации источника плутония нами использовалось отношение ^{240}Pu/^{239}Pu показано на рис. 3. Среднее значение данного отношения в профиле ТВ-1 составило 0,192 ± 0,026, для Td-1 – 0,189 ± 0,017. Полученные значения в среднем близки к значению глобальных выпадений 0,182 [9]. Значительные отклонения от этой величины могут свидетельствовать о дополнительных источниках Pu в окружающей среде [10]. Относительно высокие значения ^{240}Pu/^{239}Pu в разрезах ТВ-1 (0,315) и Td-1 (0,292) наблюдаются на глубинах 12–14 см и 9–11 см. Вероятно, источником Pu здесь являются атмосферные выпадения от аварии на Чернобыльской АЭС, для которых характерно отношение ^{240}Pu/^{239}Pu ~ 0,38–0,41 [14]. Таким образом, полученные нами данные свидетельствуют, предположительно, о некотором вкладе Чернобыльского плутония в загрязнение торфяников.

Максимальные активности ^{241}Am в профилях ТВ-1 и Td-1 составляют 2,67 ± 0,79 Бк/кг и 1,91 ± 0,19 Бк/кг и располагаются на глубине 27–29 см и 12–14 см, соответственно. Характер вертикального распределения ^{241}Am по торфяным профилям имеет относительно сглаженную форму. Выраженных пиков активности ^{241}Am, которые бы указывали на выбросы глобальных выпадений 1950–1960 гг и выбросы от чернобыльского инцидента не обнаруживается. Вероятно, это обусловлено тем, что Pu в большей степени связан с гуматами, в то время как Am преимущественно присутствует в составе подвижной части фульвокислот. Миграционная способность Am по сравнению с Pu выше [7, 8].

Активность изотопов урана ^{238}U и ^{234}U в торфяном профиле ТВ-1 варьирует в пределах < 0,01–7,03 Бк/кг и < 0,01–13,05 Бк/кг, соответственно (рис. 1). В профиле Td-1 изотопы ^{238}U и ^{234}U изменяются по профилю торфа от < 0,01 до 1,39 Бк/кг и от < 0,01 до 2,15 Бк/кг (рис. 2). Максимальная активность ^{234,238}U в профилях ТВ-1 и Td-1 находится на глубинах 6–10 см и 6–12 см. Здесь же наблюдается и максимальная концентрация урана, которая составляет для профилей ТВ-1 и Td-1 0,44–0,57 мг/кг и 0,07–0,11 мг/кг, ссоответственно. Наибольшее удержание U приходится на верхние горизонты торфяных профилей, вероятно изотопы U обладают высокой степенью подвижности и биодоступности.

Заключение

Выполнены исследования активности естественных и техногенных радионуклидов атмосферных выпадений в торфяных кернах Архангельской области, где впервые было изучено вертикальное распределение ^{239,240}Pu, ^{238,234}U, ^{137}Cs, и ^{241}Am на примере двух торфяных кернов. Наличие двух выраженных пиков активности ^{240}Pu и ^{239}Pu в обоих торфяных разрезах и расчет атомного отношения ^{240}Pu/^{239}Pu показал, что источниками загрязнения торфяников европейской субарктики России являются глобальные выпадения в результате атмосферных испытаний 1950–1960 годов и в результате чернобыльской аварии. Для ^{238,234}U, ^{137}Cs и ^{241}Am было характерно наибольшее удержание в верхних торфяных горизонтах, при этом характер вертикального распределения по разрезу имеет сглаженную форму. Здесь мы не наблюдаем чётко выраженных пиков активности, которые бы указывали на выбросы глобальных выпадений 1950–1960 гг и выпадения в результате чернобыльской аварии.

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ в рамках научного проекта № 19-55-04001, а также в рамках гранта РФФИ № 18-05-60151.

Литература

1. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре: рекомендация МВИ МН 3421-2010; разработчик Белорусский государственный институт метрологии. – Минск, БелГИМ; опубл. 2010.
2. Методика измерения удельной активности изотопов урана (^{238}U, ^{234}U, ^{235}U) в образцах почв, грунтов, донных отложений, горных пород и строительных материалов на их основе альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой: номер в федеральном реестре росстандарта ФР.1.40.2013.15390. А. Е. Бахур, Л. И. Мануилова, Д. М. Зуев, Т. М. Овсянникова, Т. П. Трухина; разработчик лаборатория изотопных методов анализа ФГУП «ВИМС» Москва. – регистрационный номер разработчика 16/13-3Г182; опубл. 2013. – 15 с.
3. Методика определения активности стронция-90 и трансурановых элементов в биологических объектах: МН 1892-2003. В. П. Миронов, Л. П. Кудряшов; разработчик Институт радиобиологии НАН Белоруссии. – Минск; опублик., 2003. – 17 с.
4. Denecke M. A. Sources and Behaviour of Actinide Elements in the Environment / M. A. Denecke, N. Bryan, S. Kalmykov, K. Morris, F. Quinto. – Chapter 8: From Experimental and theoretical approaches to actinide chemistry. – edited by John K. Gibson, Wibe A. de Jong. – Lawrence Berkeley National Laboratory, California, USA, 2018. – P. 378–444.
5. Fiałkiewicz-kozieł B. High-resolution age-depth model of a peat bog in Poland as an important basis for paleoenvironmental studies / B. Fiałkiewicz-kozieł, P. Kołaczek, N. Piotrowska, A. Michczyński, E. Łokas, P. Wachniew, M. Woszczyk, B. Sensuła // Radiocarbon, 2014. – № 56 (1). – P. 109–125.
6. Gerdol R. The vertical distribution of the ^{137}Cs derived from Chernobyl fall out in the uppermost Sphagnum layer of two peatlands in the southern Alps (Italy) / R. Gerdol, S. Degeto, D. Mazzotta, G. Vecchiati // Water, Air, & Soil Pollution, 1994. – № 75. – P. 93–106.
7. Goryachenkova T. A. Dependence of the migration ability of plutonium and americium in soils on additions of natural and modified organic compounds / T. A. Goryachenkova, I. E. Kazinskaya, V. S. Ryleeva, A. V. Abramova, A. P. Novikov // Radiochemistry, 2013. – № 6. – P. 639–646.
8. Kazinskaya I. E. Association of radionuclides with components of fulvic acids isolated from soils / I. E. Kazinskaya, T. A. Goryachenkova, A. P. Novikov, S. E. Vinokurov, V. V. Tkachev // Radiochemistry, 2012. – № 1. P. – 87–91.
9. Kelley M. Global distribution of Pu isotopes and ^{237}Np / M. Kelley, L. A. Bond, T. M. Beasley // Science of the Total Environment, 1999. – № 237 (238). – P. 483–500.
10. Ketterer M. E. Determination of plutonium and other transuranic elements by inductively coupled plasma mass spectrometry: a historical perspective and new frontiers in the environmental sciences / M. E. Ketterer, S. C. Szechenyi // SpectrochimicaActa Part B, 2008. – № 63. – P. 719–737.
11. Łokas E. Sources and vertical distribution of ^{137}Cs, ^{238}Pu, $^{239+240}$Pu and ^{241}Am in peat profiles from southwestern Spitsbergen/ E. Łokas, J. W. Mietelski, M. E. Ketterer, K. Kleszcz, P. Wachniew, S. Michalska, M. Miecznik // Applied Geochemistry, 2013. – № 28. – P. 100–108.
12. Mihalik J. Fractionation of ^{137}Cs and Pu in natural peatland / J. Mihalik, M. Bartuskova, Z. Holgye, T. Jezkova, O. Henych // Journal of Enviromental Radioactivity, 2014. – № 134. – P. 14–20.
13. Mroz T.Atmospheric fallout radionuclides in peatland from Southern Poland / T. Mroz, E. Łokas, J. Kocurek, M. Gasiorek // Journal of Environmental Radioactivity, 2017. – № 175–176. – P. 25–33.
14. Muramatsu Y. Concentrations of ^{239}Pu and ^{240}Pu and their isotopic ratios determined by ICP-MS in soils from the Chernobyl 30-km zone / Y. Muramatsu, W. Rühm, S. Yoshida, K. Tagami, S. Uchida, E. Wirth // Environmental Science & Technology, 2000. – № 34. – P. 2913–2917.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЙ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫПАДЕНИЯХ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА ТОМСКА И ОБСЕРВАТОРИИ «ФОНОВАЯ»

В. С. Бучельников[1], Е. Г. Язиков[1], М. П. Тентюков[2], А. В. Таловская[1]

[1]Томский политехнический университет
Томск, Россия, victor.buchelnikov@yandex.ru, yazikoveg@tpu.ru, talovskaj@yandex.ru
[2]Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина
Сыктывкар, Россия, tentukov@yandex.ru

COMPARISON OF RADIOACTIVE ELEMENTS' ABUNDANCE IN AEROSOL PRECIPITATIONS IN TOMSK AND "FONOVAYA" OBSERVATORY

V. S. Buchelnikov[1], E. G. Yazikov[1], M. P. Tentuikov[2], A. V. Talovskaya[1]

[1]Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia, victor.buchelnikov@yandex.ru, yazikoveg@tpu.ru, talovskaj@yandex.ru
[2]Pitirim Sorokin Syktyvkar State University
Syktyvkar, Russia, tentukov@yandex.ru

The aim of article – to estimate the radioactive elements' abundance in urban and background aerosol, collecting by passive sampling and Th/U correlation also. Scan electron microscopy allowed demonstrating some kinds of aerosol particles with radioactive elements.

Введение

Техногенные аномалии загрязняющих веществ в атмосфере определяются как внутренними (химическими, токсикологическими) свойствами, так и внешними геохимическими условиями, а также природными факторами, влияющими на их миграционную способность и накопление в приземном воздухе [3].

Для урбанизированных территорий характерно большое разнообразие выбросов, определяющееся их промышленной специализацией, при этом формируются потоки загрязняющих веществ, которые в свою очередь могут распространяться с помощью атмосферных и водных потоков, накапливаясь в почве, поверхностных и подземных водах, донных отложениях, растениях.

Вредные выбросы, загрязняющие атмосферу, включают в себя: атмосферную пыль, газы и пары. В сочетании с другими факторами пыль и аэрозоли несут существенную угрозу для здоровья человека. Кроме того, аэрозольные частицы распространению радиоактивного загрязнения [2]. Так, частицы угля, основные концентраторы токсичных и радиоактивных элементов.

Объектом исследования является городская и фоновая территория, предметом исследования – аэрозольное вещество, собранное на фильтрах, а также твёрдый осадок снежных слоёв.

Цель работы – проследить динамику поступления пылеаэрозолей по данным послойного анализа снегового покрова в зоне влияния Томской ГРЭС-2.

Материалы и методы

Методика проведения исследований включала в себя отбор аэрозольного вещества с помощью пассивных пробоотборников (импульвераторов), снежного покрова послойным методом [1]. Фильтры, извлеченные из импульвераторов отправлялись на исследование элементного состава водо- и кислоторастворимой фракции аэрозоля, осуществлявшееся методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в ООО «Химико-аналитический центр "Плазма"» (г. Томск). Для определения величины накопления элементов в фильтрах проводился расчет коэффициентов аэрозольной аккумуляции на основе сравнения состава фильтров из импульвераторов с чистыми.

Снежный покров отбирался послойным методом на фоновой точке, а также в зоне влияния объекта теплоэнергетики – Томской ГРЭС-2. Также на территории города Томска в зоне влияния ГРЭС-2, осуществлялся на городской территории вблизи станции высотного зондирования ИОА им. В. Е. Зуева СО РАН (Томский Академгородок), пригородной территории (посёлок Геологов), фоновой территории (обсерватория «Фоновая») ИОА им. В. Е. Зуева СО РАН.

Послойные отборы снежного покрова проводились в течение зимнего периода 2018–2019 гг. с помощью послойного снегоотборника конструкции М. П. Тентюкова

Минеральный состав проб твердого осадка снега изучался в учебно-научной лаборатории электронно-оптической диагностики МИНОЦ «Урановая

Таблица 1. Коэффициенты аэрозольной аккумуляции радиоактивных элементов в водо- и кислоторастворимой фракциях аэрозоля по данным сезонных отборов на обсерватории «Фоновая»

Элемент	Водорастворимая			Кислоторастворимая		
	Осень	Зима	Весна	Осень	Зима	Весна
Th	3,27	6,84	8,47	2,73	3,24	1,91
U	2,89	3,64	4,85	1,37	1,62	2,00
Th/U	1,13	1,88	1,75	1,99	2,00	0,96

геология» ТПУ с применением сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi S-3400N с ЭДС Bruker XFlash 4010/5010 для проведения рентгеноспектрального анализа.

Результаты и их обсуждение

Расчет коэффициентов аэрозольной аккумуляции радиоактивных элементов показал, что для элементов как водо- так и кислоторастворимой фракций характерны сезонные изменения химического состава. Каждая фракция характеризуется обогащением некоторыми элементами в течение всех трёх сезонов. На основе сопоставления значений данных коэффициентов было рассчитано Th/U отношение (табл. 1).

Как видно из таблицы, водорастворимая фракция аэрозоля характеризуется большими значениями коэффициентов аэрозольной аккумуляции для радиоактивных элементов, в то же время, кислоторастворимая фракция в осенний и зимний периоды имеет несколько большие значения. Также данная фракция характеризуется, несколько большим содержанием урана по сравнению с торием в весенний период.

Рассматривая коэффициенты тория и урана во фракциях аэрозоля пригородной территории (табл. 2), было отмечено, что наибольшие значения коэффициентов приходятся на водорастворимую фракцию, в то же время значение отношения больше в кислоторастворимой.

По сравнению с фоном, пригородная территория имеет большие значения коэффициентов обоих элементов, вероятно, это связано с большей техногенной нагрузкой на данной площадке, в частности, с работой угольной котельной.

Изучение минерального состава твёрдого осадка снеговых слоёв позволяет частично определить формы нахождения химических элементов в аэрозоле.

По результатам исследований на сканирующем электронном микроскопе среди массы общераспространенных частиц были выделены специфичные, в том числе, имеющие в составе радиоактивные элементы.

Так, исследую снеговые слои из зоны влияния Томской ГРЭС-2, в одном из горизонтов была обнаружена минеральная фаза, представляющая собой

Таблица 2. Коэффициенты аэрозольной аккумуляции радиоактивных элементов в водо- и кислоторастворимой фракциях аэрозоля по данным пассивных отборов на пригородной территории

Элемент	Водорастворимая	Кислоторастворимая
Th	8,6	4,0
U	5,2	1,7
Th/U	1,7	2,4

фосфат редкоземельных элементов с примесью тория (предположительно, монацит) размером 4 • 2 μm (рис. 1).

Особенности состава данной фазы позволяют предположить, что её поступление в окружающую среду связано с процессом сжигания угля, что подтверждается другими исследованиями (рис. 28, 29, 30).

Также минеральная фаза, содержащая радиоактивный элемент была обнаружена на фоновом участке (рис. 2).

Особенности элементного состава, а также ветровой режим в течение зимнего периода позволяют предположить, что источник данной фазы расположен за пределами Томской области, а её попадание на фоновый участок может объясняться механизмами дальнего переноса, что так же подтверждается и её меньшим размером по сравнению с общераспространенными фазами.

Заключение

Таким образом, были рассмотрены особенности содержания радиоактивных элементов в аэрозоле на территории г. Томска и фоновой площадки, отмечено, что водо- и кислоторастворимая фракции различаются по содержанию урана и тория. Большие значения коэффициентов аэрозольной аккумуляции для пригородной территории объясняются значительным техногенным воздействием на территорию по сравнению с фоном.

На примере исследования минерального состава твёрдого осадка снега были выявлены частицы, содержащие радиоактивные элементы, присутствующие в аэрозоле. Отмечено, что на городской территории поступление подобных частиц связано с

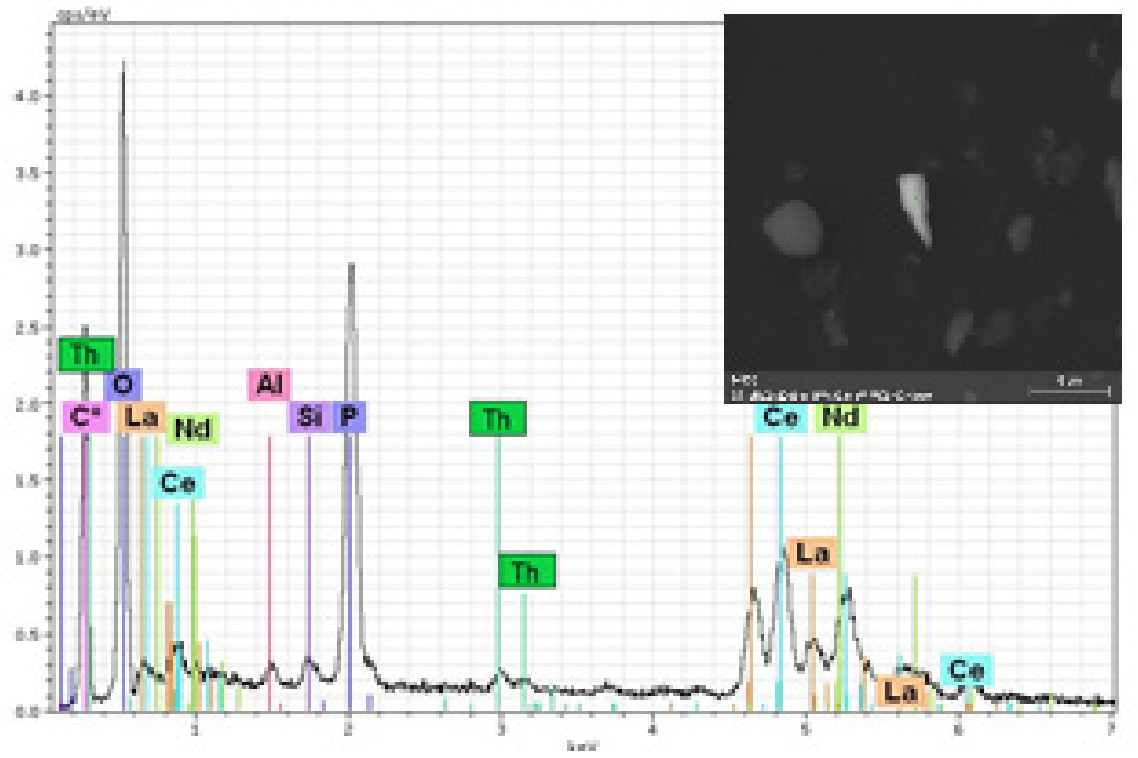


Рис. 1. Минеральная фаза фосфата редкоземельных элементов с примесью тория

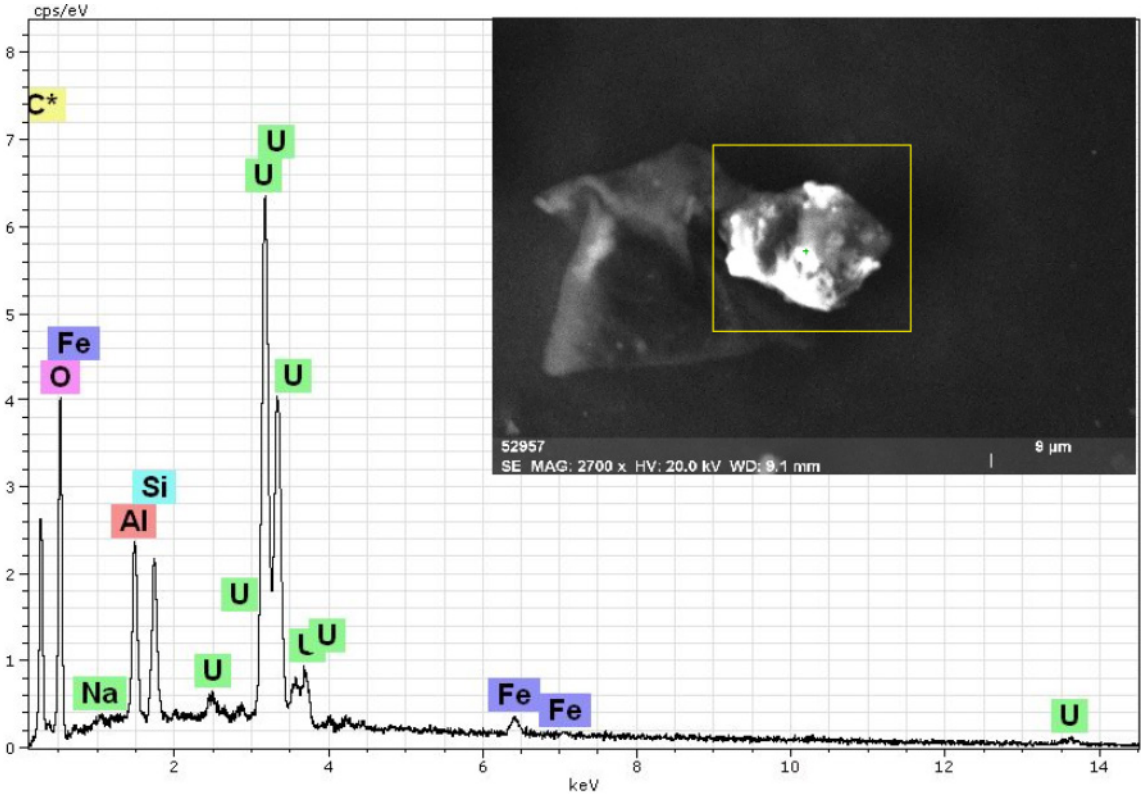


Рис. 2. Урансодержащая минеральная фаза

работой местных предприятий теплоэнергетики, а на фоновую точку их поступление может быть связано с дальним переносом.

Литература

1. Пат. 2411487 Российская Федерация, МПК G 01 N 1/04. Снегоотборник Тентюкова / Тентюков М. П.; заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. – N 2009131266/05; заявл. 17.08.2009; опубл. 10.02.2011, Бюлл. № 4. – 9 с.: ил.
2. Рубцов Д. Е. Аэрозольное загрязнение атмосферы / Д. Е. Рубцов // Успехи современного естествознания, 2010. – № 7. – С. 14.
3. Assessment and Management of Urban Air Quality in Europe (EEA Environmental Monograph), by European Environment Agency (Author), Dorothee A. U. Richter (Editor), W. Peter Williams (Editor), 1998. – 150 p.

УРАН И ТОРИЙ В БУРЫХ УГЛЯХ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

В. И. Вялов[1,2], А. В. Наставкин[2], Е. П. Шишов[1]

[1]ФГБУ «ВСЕГЕИ»
Санкт-Петербург, Россия, vladimir_vyalov@vsegei.ru
[2]Южный федеральный университет
Ростов-на-Дону, Россия, nastavkin@sfedu.ru

URANIUM AND THORIUM IN BROWN COAL OF THE FAR EAST OF RUSSIA

V. I. Vyalov[1,2], A. V. Nastavkin[2], E. P. Shishov[1]

[1]A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI)
St. Petersburg, Russia, vladimir_vyalov@vsegei.ru
[2]Southern Federal University
Rostov-on-Don, Russia, nastavkin@sfedu.ru

The article makes an attempt to study the content and distribution of uranium and thorium in brown coal of the Far East of Russia (Primorsky, Khabarovsk, Kamchatka, Magadan, Sakhalin, Jewish Autonomous regions). ICP AES, ICP MS, mass spectrometry with laser ablation, electron microscopy with microanalysis were used. It has been founded out that usually the thorium content is 1.5–3 times higher than the uranium content. Uranium and thorium are characterized by a positive correlation with the ash content of coal. Anomalous concentrations of uranium were recorded in the ash of low ash coal, where they reach commercial levels.

Введение

Изучение U в углях имеет давнюю историю (см. обзор в [5]). Ураноносность углей Дальнего Востока была описана В. И. Данчевым и Н. П. Стреляновым в 1979 г. в угленосных впадинах кайнозойского возраста, где были выделены так называемые экзодиагенетические месторождения U. При этом были отмечены характерные особенности уранового оруденения углей: приуроченность к ложбинам гранитного фундамента в краевых участках угленосных впадин, пластовая и пластово-линзовидная форма рудных тел, выклинивающихся по падению пластов, преобладание органических форм U при подчиненной доле его минеральных носителей [3]. В табл. 149 [5] приведены отрывочные сведения по повышенной ураноносности Лузановского участка Павловского месторождения, а также Раковского месторождения. Данных о концентрациях Th в указанных угольных объектах не приводилось.

В настоящее время исследования урана в углях приобрели дополнительную актуальность из-за лучшей «экологичности» ядерного топлива по сравнению с угольным.

В мире возрастает интерес к торию, как реальной замене урана в качестве топлива в ядерных реакторах, что стимулирует рост внимания к его природным источникам, как правило, комплексным месторождениям различных рудных формаций, с целью выявления среди них наиболее привлекательных объектов ведущих геолого-промышленных типов [4]. При этом рассматриваются даже карбонатиты с содержанием Th 30–40 г/т (месторождение Айрон-Хилл, США) и оценкой ресурсов 24800 тонн Th этого природного объекта [4]. В этой связи, раци-

онально изучить содержание и распределение Th в углях на примере бурых углей Дальневосточного региона РФ.

Материалы и методы

Каменный материал представлен 78 пробами углей Павловского месторождения, в том числе участка «Спецугли»; 36 пробами углей Раковского месторождения; 163 пробами углей Лианского, Мухенского, Ушумунского месторождений; 120 пробами углей Сахалина (Новиковское месторождение); 18 пробами углей Вилигинского месторождения; 26 пробами углей Эчваямского месторождения.

Содержания урана и тория в угольных образцах определены с использованием масс-спектрометрии, атомно-эмиссионного метода с индуктивно-связанной плазмой (ICP AES, сплавление, в золе углей, на Th и U, ICP MS с полным кислотным вскрытием (U)); масс-спектрометрии с лазерной абляцией на Th и U; электронной микроскопии с микроанализом. Результаты исследований обработаны с применением методов математической статистики.

В Центральной лаборатории ВСЕГЕИ получены результаты масс-спектрометрического анализа на уран и торий по указанному количеству отобранных проб углей данных месторождений бурых углей Дальнего Востока. Также задействованы результаты масс-спектрометрии с лазерной абляцией по 96 точкам микрозондирования мацералов (витринит, аттрито-витринит) по аншлиф-штуфам углей участка «Спецугли» Павловского месторождения. В Центре коллективного пользования «Центр исследований минерального сырья и состояния окружающей среды» ЮФУ получены результаты растровой электронной микроскопии угольных аншлифов с микроанализом.

Результаты и их обсуждение

Установлено, что обычно содержания Th в 1,5–3 раза превышают содержания U. Средние содержания U и Th в золе углей Павловского месторождения, как и для углей Сахалина, около 5 и 15 г/т, соответственно, Ушумунского и Лианского месторождений – U 4–5,5 г/т, Th 25,3–26 г/т. На Мухенском, Вилигинском, Эчваямском месторождениях концентрации названных элементов ниже.

Содержание и распределение урана и тория в углях Ушумунского месторождения зависит от зольности (рис. 1).

Для U и Th характерна положительная корреляционная связь с зольностью углей, для выборки с концентрациями элементов в угле. Коэффициент парной корреляции как U, так и Th с Ad углей Ушумунского месторождения составляет 0,9 при объеме выборки 44 пробы. При этом U и Th в угле положительно и значимо коррелируют со многими элементами – TiO_2 (рутил?), Cr, Ga, Sc, всеми РЗМ, Zr, Ni, Cs, Ta. Между U и Th коэффициент корреляции составил 0,93.

Содержание U и Th в золе по группам зольности углей показано на рис. 2. Видимо, оно примерно постоянно в самой минеральной части, но имеет тенденцию к некоторому снижению с ростом зольности (влияние снижения содержания органического вещества (ОВ) или изменение состава минерального носителя?).

Распределение U в углях пласта А-10 Лианского месторождения, приуроченного к нижней части ушумунской свиты, мощность которого достигает 16,7 м (скважина 56, участок Южный), также зависит от зольности углей. Крайние верхняя и нижняя пачки пласта имеют большую по сравнению с центральными зольность (28 %). Содержания U коррелируют с зольностью и достигают максимума в верхней пачке. Ниже по разрезу ушумунской свиты, на глубине 50–58 м (скв. 365, 892), в зоне развития пластов В4–В13 отмечаются пики концентраций Th (до 14,5 г/т в угле) и U (до 3,2 г/т) преимущественно в тонких (0,2–1,2 м) и средней мощности пластах (2,1–2,6 м) в средне- и высокозольных углях.

Таким образом, при невысоких, близких к фоновым, концентрациях радиоактивные элементы имеют четкую положительную корреляционную связь с зольностью углей и многими микроэлементами минеральной части. Роль ОВ в концентрации U и Th, видимо, второстепенна или малозначима.

Однако, картина распределения радиоактивных элементов в бурых углях Дальнего Востока может резко меняться, с бурным всплеском их аномальных концентраций и потерей их связи с зольностью. Так, нами установлены максимальные содержания U и Th в углях Раковского месторождения (Приморье), соответственно, до 1400–3670 и 166–286 г/т в золе (табл. 1), в угольных пластах III и IIIн на северо-восточном (СВ) участке Раковского разреза, и на юго-восточном (ЮВ) участке – в пласте III.

Угольный разрез (рис. 3, А) расположен в непосредственной близости от выхода на поверхность палеозойских гранитоидов (рис. 3, Б).

Как следует из табл. 1, аномальные концентрации U зафиксированы в золе малозольных углей, где достигают промышленных содержаний (по [1]) в сравнении с некоторыми известными промышленными типами урановых руд. Th же не всегда проявляет тенденции к концентрации в золах малозольных углей. Отметим, что по отдельным пробам (табл. 1) примерно в 30 % случаев Th имеет концентрации значительно меньшие, чем U. Средние значения U и Th в углях Раковского разреза, соответственно, 41,5 и 15,7 г/т (при средней зольности углей 19,2 %), а в золе – 354,6 г/т (U) и 89,1 г/т (Th). То есть, в целом, содержание U больше в несколько раз, чем Th, по

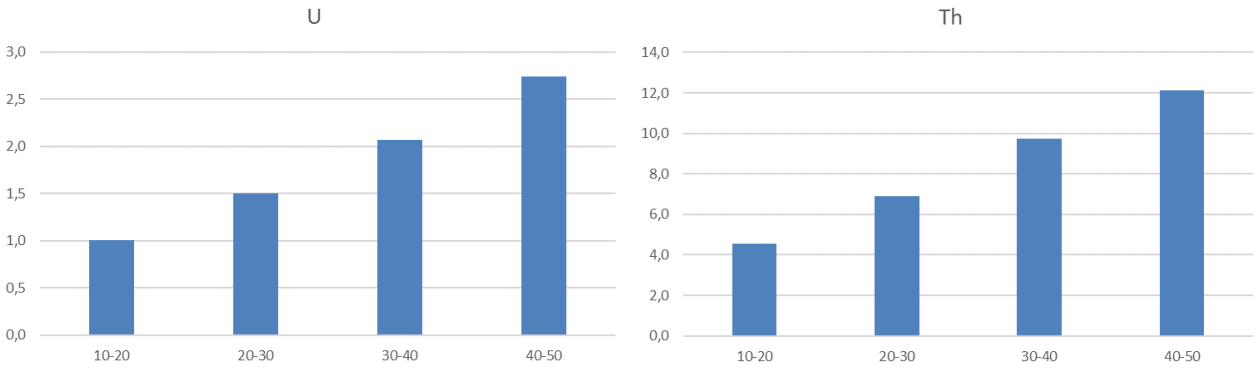


Рис. 1. U и Th в угле по группам зольности углей Ушумунского месторождения

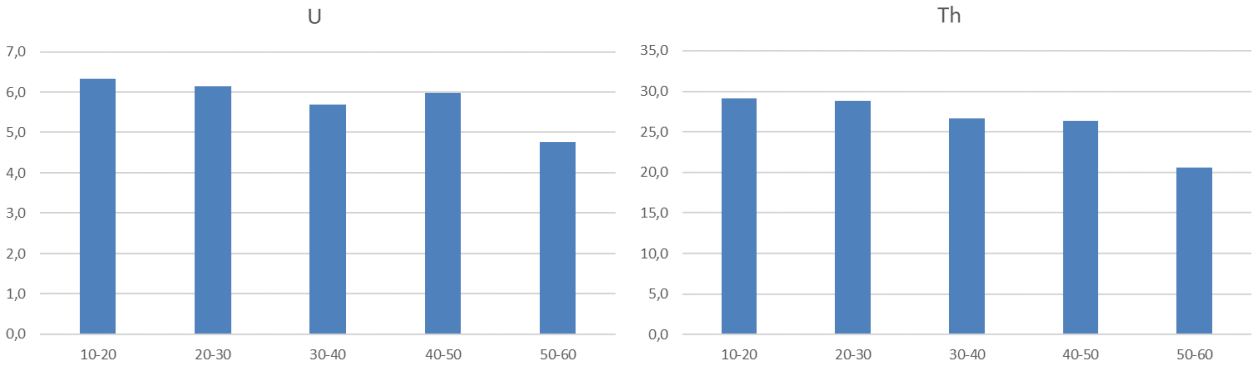


Рис. 2. U и Th в золе по группам зольности углей Ушумунского месторождения

Таблица 1. Содержания U и Th в золе углей Раковского месторождения и зольность углей

№№	Шифр пробы	Th	U	A^d	№№	Шифр пробы	Th	U	A^d
1	Р-СВ-111 /1	51,6	27	12,7	19	Р-СВ-111н/5	62	72	27,9
2	Р-СВ-111 /2	71,1	35,5	22	20	Р-СВ-111н/6	286	279	8,98
3	Р-СВ-111 /3	35,4	9,26	58,9	21	Р-СВ-111н/6а	32,6	38,5	59,4
4	Р-СВ-111 /4	51,6	26,8	35,1	22	Р-СВ-111н/7	90,2	55	25,9
5	Р-СВ-111 /5	34,1	3670	8,34	23	Р-СВ-111н/8	77,4	85	25,6
6	Р-СВ-111 /6	31,4	8,12	67,5	24	Р-СВ-111н/9	54,8	26,4	34,8
7	Р-СВ-111 /7	96,8	64,9	10,5	25	Р-СВ-111н/10	18,7	7,28	95,3
8	Р-СВ-111 /8	141	54,8	40,9	26	Р-ЮВ-111/ 1	56,7	86,6	28,3
9	Р-СВ-111 /9	74,7	52,4	11,3	27	Р-ЮВ-111/ 1а	92,1	635	11,8
10	Р-СВ-111 /10	166	113	7,76	28	Р-ЮВ-111/2	77,3	31,4	24,8
11	Р-СВ-111 /11	155	80,6	17,6	29	Р-ЮВ-111/3	35,5	1540	6,77
12	Р-СВ-111 /12	44,7	13,6	74,5	30	Р-ЮВ-111/4	21,3	1400	7,75
13	Р-СВ-111 /13	66,9	32	23,6	31	Р-ЮВ-111/5	94,1	107	22,2
14	Р-СВ-111н/1	46,5	21,1	91,6	32	Р-ЮВ-111/6	98	373	15,1
15	Р-СВ-111н/2	116	103	14,8	33	Р-ЮВ-111/7	41,2	400	18,9
16	Р-СВ-111н/3	165	190	7,52	34	Р-ЮВ-111/8	41,9	379	46,7
17	Р-СВ-111н/3а	36	12,8	55,6	35	Р-ЮВ-111/9	136	232	8,48
18	Р-СВ-111н/4	75,7	38,3	17,7	36	Р-ЮВ-111/10	53,4	93,8	14,2

Шифр пробы состоит из первой буквы названия месторождения (Р – Раковское), участка (северо-восточный (СВ) или юго-восточный (ЮВ)), номера пласта (III, IIIн) и пробы (отбирались снизу вверх).

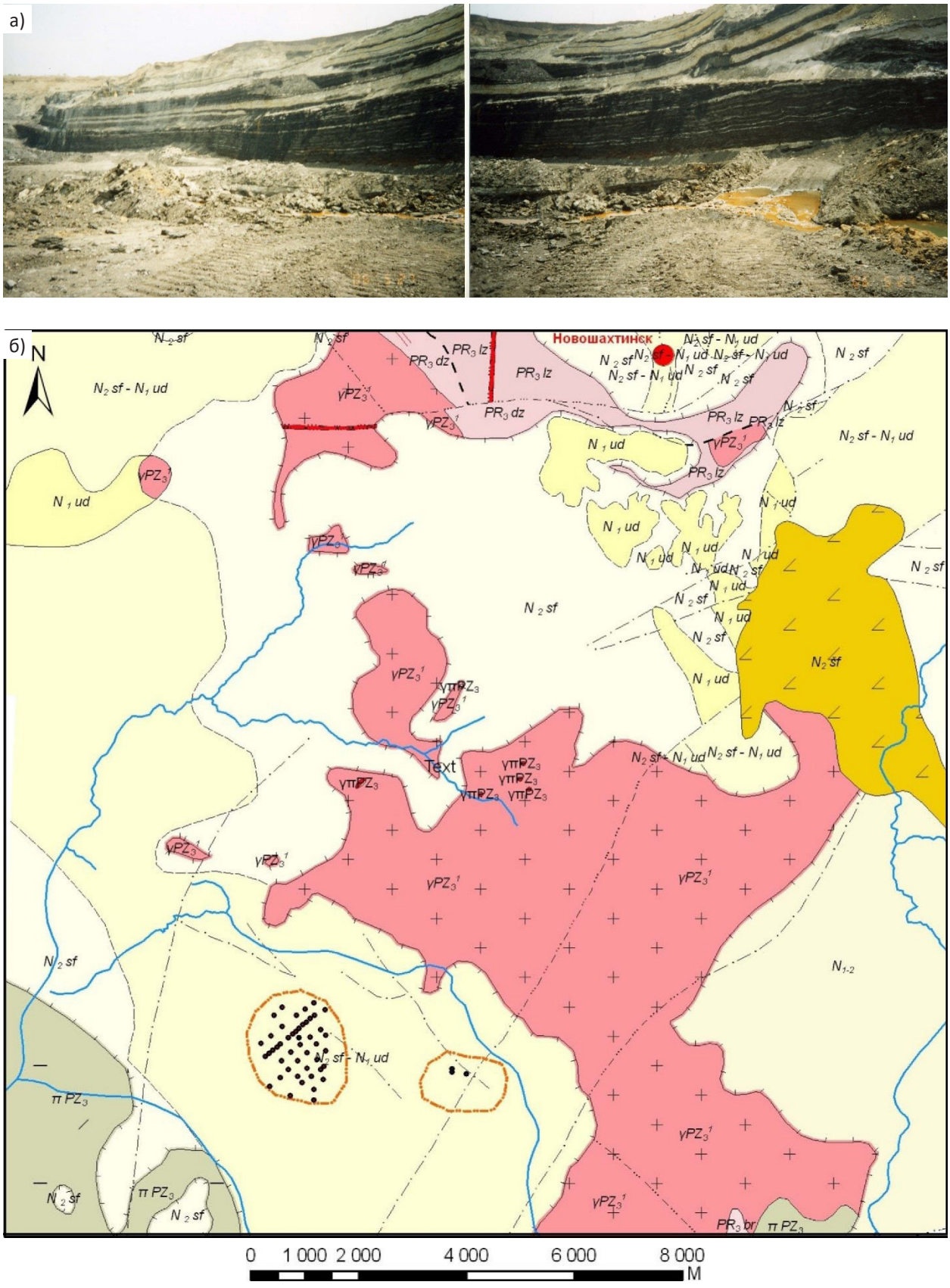


Рис. 3. А – Раковский буроугольный разрез. Б – обзорная карта района Раковского месторождения. Контур внизу в центре – границы разреза, две точки – места опробования пластов на 2-х участках. Контур внизу слева с точками-скважинами – германиеносный участок данного месторождения. Гранитоиды показаны красным цветом

сравнению с другими углями рассматриваемых месторождений с невысокими содержаниями радиоактивных элементов, где все наоборот (Th – больше).

На рис. 4 показано распределение содержаний U и Th в угле по группам зольности.

Как видно из рис. 4, для U характерна отрицательная связь с зольностью углей до Ad примерно 40 %. Коэффициент парной корреляции составляет –0,35. При этом U как в золе, так и в угле положительно коррелирует с Be, Mo, W, Sb – элементами, сопутствующими германиевому оруденению и локализующимися преимущественно в ОВ углей [2]. Ge имеет с U положительную, хотя и слабую, корреляционную связь с коэффициентом 0,16. Все это говорит о ведущей роли органического вещества углей при образовании повышенных или аномальных концентраций U, в отдельных буроугольных месторождениях (Раковское).

Для Th свойственно несколько иное распределение. В целом для выборки концентраций в угле корреляционная связь с зольностью положительна и значима (0,6). Корреляционные связи Th в угле с другими элементами иные – он их имеет с Ga, Nb, всеми РЗМ, In, а с U – отрицательную связь (–0,3). Видимо, Th в углях локализуется преимущественно в минеральных компонентах. Но в 20 % случаев малозольные угли имеют высокие концентрации Th в золе (табл. 1), что, несомненно, указывает на определенную роль ОВ в его концентрации.

При лазерной абляции углей Павловского месторождения установлено также, что в угольных мацералах U и Th больше в аттрито-витрините, чем в витрините. Наличие органического аттрита, как известно, является своеобразным индикатором динамической активности (проточности) болотных вод. То есть радиоактивные элементы больше концентрировались в ОВ при повышении проточности торфяных вод, так как их гидрогенный привнос был больше (как и минеральный).

Минералы редкоземельных элементов зафиксированы в тяжелой (1,6 и более г/см^3) фракции углей Лианского месторождения (кристаллы монацита с примесью тория приведены на рис. 5).

Заключение

Таким образом, в результате исследований можно сделать вывод, что для образования аномальных или промышленных концентраций урана в бурых углях Дальнего Востока требуются уникальные условия. Именно ОВ углей (древних торфяников) играет решающую роль в аномальной концентрации U. Однако только одного ОВ недостаточно: необходима

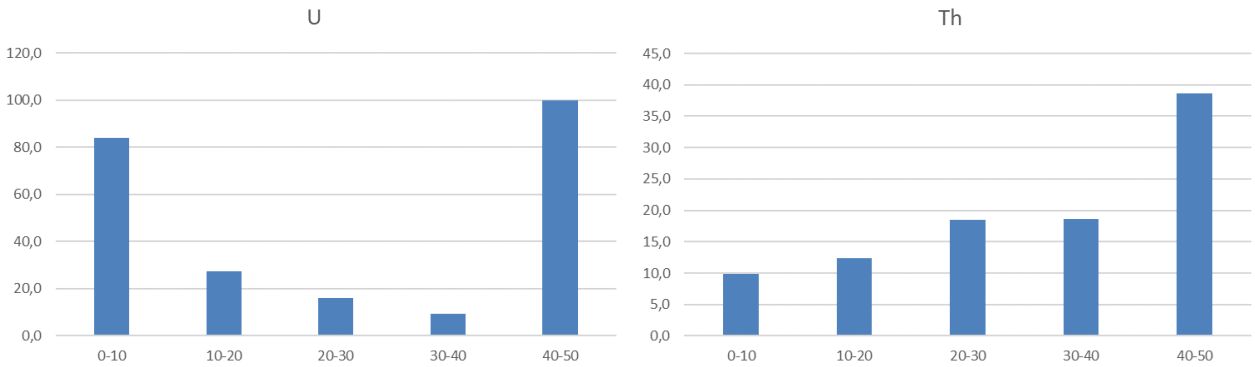


Рис. 4. U и Th в угле по группам зольности углей Раковского месторождения

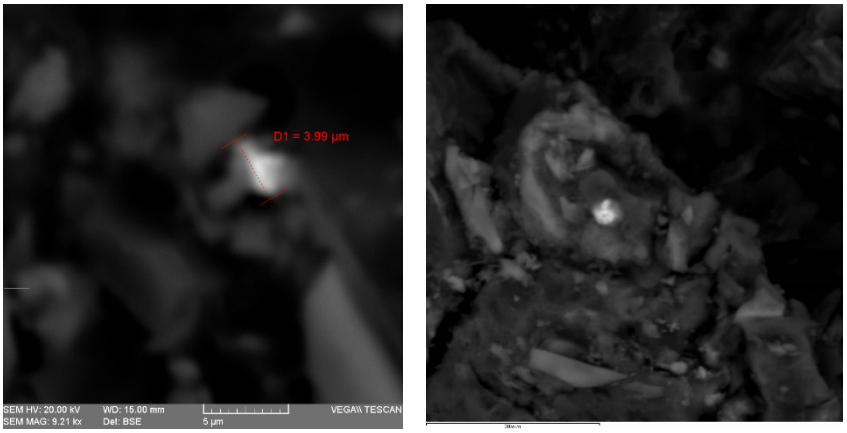


Рис. 5. Минералы редкоземельных элементов в тяжелой фракции угля Лианского месторождения (кристаллы монацита с примесью Th)

локализация угольных пластов (древних торфяников) в непосредственной близости к гранитоидам – источникам урана и тория при выветривании этих магматических пород. Хотя подобные случаи редки (Раковское месторождение, где подсчет запасов углей был ограничен на глубину из-за высокой радиоактивности, возможно, Лузановский участок Павловского месторождения в Приморье [5]), прогноз новых урано-угольных объектов на участках угольных месторождений возможен.

Что касается Th, то его локализация в углях обнаружена преимущественно в минеральной части. Роль ОВ для его концентрации проявляется гораздо слабее по сравнению с U в вышеотмеченных особых, благоприятных для локализации U, условиях. Изучение распределения Th в угольных пластах кайнозойских угленосных впадин Дальневосточного региона актуально в связи с приведенными случаями высоких концентраций и требует своего продолжения.

Литература

1. Вялов В. И., Наставкин А. В. Уровни содержаний промышленно ценных микроэлементов в углях // Химия твердого топлива, 2019. – № 5. – С. 63–67.
2. Вялов В. И., Наставкин А. В., Шишов Е. П. Особенности распределения сопутствующих германию промышленно ценных микроэлементов в углях Павловского месторождения (участок «Спецугли») // Химия твердого топлива, 2021. – № 1. – С. 17–28.
3. Данчев В. И. Экзогенные месторождения урана. – М.: Атомиздат, 1979. – 248 с.
4. Миронов Ю. Б., Карпунин А. М., Фукс В. З. Зарубежные месторождения тория // Региональная геология и металлогения, 2021. – № 86. – С. 107–115.
5. Угольная база России. Том VI (Сводный, заключительный). Основные закономерности углеобразования и размещения угленосности на территории России. – М.: ООО «Геоинформмарк», 2004. – С. 480–485.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

AUTHOR INDEX

Авдонин Г.И. 49, 568
Агапов О.А. 211
Адильбаева Т.Е. 555
Азарова С.В. 632
Айдарханова А.К. 522
Айдарханов А.О. 53, 177, 591
Айриянц Е.В. 179
Актаев М.Р. 53
Алиев Р.А. 621
Амагов Х.Р. 456
Ананьев Ю.С. 486
Андреева О.В. 464
Антонова Е.Ю. 101
Арбузов С.И. 55, 600, 630
Аршамов Я.К. 358
Аскаров Ш.А. 194
Бабаяков Э. О. 179
Бабаянц П.С. 63, 65
Баженов А.В. 68
Байкенова Г.Е. 72, 617
Барановская Н.В. 72, 94, 617
Баранчуков В.С. 76
Бахур А.Е. 435
Безденежных И.В. 215, 345, 390
Белянин Д.К. 179, 184
Берёзкин В.Ю. 76
Беремжанов Р.Б. 207
Берсимбаев Р.И. 72
Блохин М.Г. 80
Блынский П.А. 456
Бобров В.А. 302
Богуславский А.Е. 84
Бойцов А.В. 347
Болсуновский А.Я. 88, 154
Большаков А.М. 215, 345, 390
Бородина П.О. 583
Брайт Ю.Ю. 94
Брянская А.В. 284
Будаева Ю.С. 97
Бураева Е.А. 101
Бучельников В.С. 658
Вакуленко Л.Г. 413
Василенко Е.А. 626
Вах Е.А. 109
Вахрушев В.И. 154
Верещагин П.М. 476
Верчеба А.А. 36, 106
Ветошкина А.В. 109
Вовна Г.М. 423
Володина Д.А. 118
Володькова Т.В. 122
Воробьев Е.А. 161
Ворошилов Ф.А. 215, 345, 390
Вялов В.И. 127
Гаврилов Р.Ю. 167
Гаськова О. 84
Гешель И.В. 452
Гласс И.Д. 143
Гольцман Б.М. 132
Горохов А.Н. 531
Гребенкин Н.А. 136, 430
Гребенщикова В.И. 273
Гупало В.С. 448
Гурулев Е.А. 361
Гусев А.И. 139
Густайтис М.А. 385
Гутникова М.А. 382
Данилов А.А. 143
Девятиярова А.С. 149
Дементьев Д.В. 88, 154
Деркачев А.С. 350, 402, 408, 418, 550
Долгушин А.П. 159
Долгушин Д.И. 76
Домаренко В.А. 30, 143, 161, 167, 171
Дорохова Л.А. 499
Дружинина А.С. 649, 654

Дружинин С.В. 68, 637, 649, 654
Дульцев Ф.Ф. 402, 408, 413, 418
Дюсембаева М.Т. 177, 561
Дю Т.А. 127
Есильканов Г.М. 177, 561
Ефанова О. 316
Ефимов Е.Н. 613
Жамалдинов Ф.Ф. 591
Жапабаев К.А. 211
Житков В.Г. 486
Жмодик С.М. 179, 184, 284
Жуковская Е.В. 654
Жунусов Р.С. 207
Журавлев В.Г. 143
Заведий Т.Ю. 189
Замана Л.В. 194
Зарубина Н.В. 80
Зуева А.В. 88
Зукау В.В. 215, 345, 390
Зыкова Е.Н. 199
Зыков С.Б. 199, 331, 637, 649
Иборатшоев Р.Д. 202
Игнатов П.А. 106
Ильенок С.С. 55
Исамов Н.Н. 452
Искаков М.М. 207, 211
Кабанов Д.В. 215, 345, 390
Казаков К.С. 448
Кайрамбаев С.К. 207, 211
Какабаев А.А. 72, 617
Калашникова К.А. 101
Калина В.А. 325
Каменев О.В. 101
Каменецкий В.С. 149
Капитонов А.Б. 215, 345, 390
Карелин В.А. 311
Каржева О.В. 106
Карманов Е.Н. 216
Карпунин А.М. 33
Кашин С.В. 220
Кенесбаев Б.К. 171, 224
Кеслер А.Г. 568
Кириллов В.Е. 228
Кириченко И.С. 284, 385
Кирплюк П.В. 277
Коваленко Д.В. 464
Коковкин А.А. 233, 238, 241, 245
Кокорев О.Н. 189
Кокрятская Н.М. 621
Колбин В.В. 177, 561
Комиссарова О.Л. 460
Комлев В.Н. 248, 255
Контарович О.Р. 63, 65
Копылова Ю.Г. 413, 418
Коржавин А.В. 265, 373, 452
Корнеева Т.В. 402
Коробова Е.М. 76
Корюкин Г.Л. 269
Косиненко С.В. 154
Коханенко А.А. 402
Кох С.Н. 149, 392
Круглыхин А.А. 581
Кузнецов В.К. 452
Кузнецов М.С. 215, 345, 390
Кузнецов П.В. 273
Кузьменкова Н.В. 460, 508, 527
Курманаев Д.С. 456
Лавров А.С. 289
Ладейщиков А.В. 289
Лазарева Е.В. 184, 284, 385, 513
Лазарев Ф.Д. 277
Лапа С.Э. 370
Лапиков П.С. 496
Лаптев Ю.И. 289, 361, 568
Лебедкин К.А. 476
Леденгский Р.А. 277, 294
Леденева Н.В. 216
Ленкевич В.Л. 456
Леонова Г.А. 302
Липатов Д.Н. 307
Липихина А.В. 94
Литау В.В. 555
Лобков Д.С. 311
Ляхова О.Н. 522
Мажейка Й. 316
Макарова И.В. 608
Макаров В.Н. 320
Макарьев Л.Б. 325
Максимова А.А. 350, 402, 408, 413, 418, 550
Малин А.В. 311
Малов А.И. 331, 637
Малов В.И. 385
Малов Г.И. 335, 426
Мальцев А.Е. 302, 491

Малютин В.М. 215, 345, 390
Мамихин С.В. 307
Манахов Д.В. 307
Маниковский П.М. 340
Маренкова Е.А. 215, 345, 390
Машковцев Г.А. 347
Машнин Д.М. 430
Медешова Н.А. 350
Меджидов И.М. 354, 587
Мезина К.А. 302
Мельгунов М.С. 302, 402, 608
Мендыгалиев А.А. 358
Минкина Т.М. 101
Миносьянц А.Р. 361
Миронов А.Г. 179
Миронов Ю.Б. 33, 161, 366, 398
Митрофанов Е.А. 486
Михайлова Л.А. 370
Михайлова Т.А. 101
Михайловская Л.Н. 76, 373
Мишагина А.С. 471
Мишанькин А.Ю. 377
Мищенко Е.В. 654
Модоров М.В. 76
Мороз Т.Н. 179
Мурлис Д.В. 471
Мухамедияров Н.Ж. 177, 561
Мухин В.М. 382
Мягкая И.Н. 385, 513
Наставкин А.В. 661
Неволин Н.Р. 215, 345, 390
Некипелова А.В. 392
Неуважаев Г.Д. 448
Нигматулина Е.Н. 149
Николкин В.Н. 265
Нимаева Б.В. 370
Новгородцев А.А. 361, 398, 486
Новиков Д.А. 350, 402, 408, 413, 418, 550
Ножкин А.Д. 423
Носков М.Д. 49, 568
Овдина Е.А. 335, 426
Овсянникова Т.М. 430, 435
Овчарова Е.С. 143
Огиенко А.В. 101
Озерский А.Ю. 443
Озерский Д.А. 448
Онищенко А.Н. 277
Орехов А.Н. 536
Орехов К.А. 536
Орлов А.С. 637
Осипова Н.А. 555
Очеретенко А.А. 654
Паничев А.М. 109
Панов А.В. 452
Панова Е.Н. 207, 456
Парамонова Т.А. 460
Перегудина Е.В. 171
Перменев Ю.Г. 211
Петров В.А. 464
Петрошюс Р. 316
Печенкин И.Г. 24
Пластун С.А. 215, 345, 390
Полонянкина С.В. 347
Полуэктов В.В. 464
Полякова Е.Г. 443
Полякова И.В. 354, 587
Понизов А.В. 471, 476
Пономарчук В.А. 179
Попов Н.Ю. 600
Портнов А.М. 481
Поцелуев А.А. 486
Прейс Ю.И. 302, 491
Прохоров Д.А. 430, 435
Пуговкин А.А. 366
Пучков А.В. 496, 641, 645
Пыряев А.Н. 179
Раимканова А.М. 522
Рапута В.Ф. 499
Ревнивцев И.С. 101
Ржевская А.К. 136
Рихванов Л.П. 491
Робертус Ю.В. 504
Рогожина М.А. 136
Рожкова А.К. 508, 527
Романов С.Л. 76
Руденко А.А. 143
Сайдуллаева С.А. 211
Сарыг-оол Б.Ю. 284, 385, 513
Сафонов А.В. 84
Сащенко А.В. 49, 517
Семенов А.С. 215, 345, 390
Сержанова З.Б. 522
Сибирцев А.М. 527
Сидорина Н.Г. 402

Собакин П.И. 531, 595
Соболев И.С. 536
Собянин Ю.П. 377
Сокол Э.В. 149, 392
Сохорева В.В. 215, 345, 390
Спиров Р.К. 654
Стародубов А.В. 430, 435
Стародымова Д.П. 621
Страховенко В.Д. 335, 426, 541
Субботин М.Д. 605
Субботин С.Б. 53
Субетто Д.А. 621
Сутягин А.А. 547
Сухорукова А.Ф. 408, 550
Таловская А.В. 97, 118, 555
Тарасов О.В. 76
Тарханов А.В. 347
Тарханова Г.А. 49
Таскина Л.В. 194
Ташекова А.Ж. 177, 561
Темиржанова А.Е. 177, 561
Тентюков М.П. 564
Теровская Т.С. 568
Тлеукенов Е.О. 456
Токтаганов Т.Ш. 53
Толстов А.В. 184
Торебеков А.К. 456
Торопов А.С. 573
Торосян Е.С. 97, 555
Травкина А.В. 621
Трапезников А.В. 265, 373, 452
Трапезникова В.Н. 265, 373
Трофимова Е.А. 88
Трофимов С.В. 132
Трусов А.А. 63, 65
Тубольцев И.С. 430
Тузова Т.В. 576
Турченко Д.В. 581
Турыкин Л.А. 460
Турышев В.В. 583
Тхорик О.В. 354, 587
Тышов А.С. 331, 496
Тюленева В.М. 517
Умаров М.А. 581
Урбисинова А.А. 207
Ушакова Е.В. 496
Филимоненко Е.А. 377
Фомин В.Ю. 143
Фукс В.З. 33
Харламов В.А. 354, 587
Харченко А.А. 591
Хващевская А.А. 402, 408, 413, 418
Цыкарева Ю.В. 496
Чевычелов А.П. 531, 595
Чекрыжов И.Ю. 55, 80, 109, 600
Черепнёв М.С. 215, 345, 390
Черкасов А.А. 550
Черных А.В. 402, 408, 413, 418
Чиж Т.В. 354, 587
Чистякова И.Е. 136
Чистякова Н.Ф. 605
Чугуевский А.В.v 608
Чупаков А.В. 621
Шадин А.Е. 101
Шакенов Е.З. 177, 561
Шалдыбин М.В. 613
Шапошников О.В. 269
Шарипова Б.У. 617
Шатров А.Н. 591
Шварцева О.С. 84
Шевченко В.П. 621
Шестериков А.Ю. 587
Ширабон О.А. 527
Шишко В.И. 587
Шишов Е.П. 661
Юргенсон Г.А. 626
Юсупов Д.В. 499
Язиков Е.Г. 30, 97, 118, 177, 358, 377, 555, 561, 630, 632
Яковлев Е.Ю. 68, 199, 496, 637, 641, 645, 649, 654
Ян П.А. 413
Ярославцева Т.В. 499
Яценко Е.А. 132
Abdelhalim S. Mahmoud 45
Aleksey V. Nastavkin 45
Arynova S.Z. 42
Belyanovskaya A.I. 42
Hanaa El-Dokouny 45
Hasson N. 496
Maher Dawoud 45
Mohamed Ghoneim 45
Rikhvanov L.P. 42
Robert B. Finkelman 47
Sergey Arbuzov 47

Научное издание

РАДИОАКТИВНОСТЬ И РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В СРЕДЕ ОБИТАНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Материалы
VI Международной конференции

Том 1

Компьютерная верстка *В. В. Жуков*

Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета

Подписано к печати 13.09.2021. Формат 60×84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать CANON. Усл. печ. л. 78,05. Уч.-изд. л. 70,59.
Заказ 155-21. Тираж 200 экз.

Издательство
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

РАДИОАКТИВНОСТЬ И РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В СРЕДЕ ОБИТАНИЯ ЧЕЛОВЕКА

МАТЕРИАЛЫ VI МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Том 1