

**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ISSN (print) – 2500-1019
ISSN (on-line) – 2413-1830

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 334, № 1, 2023

Издательство
Томского политехнического университета
2023

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленекс О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Чогегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)
Третьяк А.Я., д-р техн. наук (Россия)
Арбузов С.И., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Ковалев В.З., д-р техн. наук (Россия)
Романенко С.В., д-р хим. наук (Россия)
Кириянова Л.Г., канд. филос. наук (Россия)
Строкова Л.А., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Мазуров А.К., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Боярко Г.Ю., д-р экон. наук, канд. геол.-минерал. наук (Россия)
Стрижак П.А., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)

Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2023

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» – рецензируемый научный журнал, издающийся с 1903 года.

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.

ISSN (print) – 2500-1019
ISSN (on_line) – 2413-1830

«Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» публикует оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области геологии, разведки и добычи полезных ископаемых, технологии транспортировки и глубокой переработки природных ресурсов, энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе полезных ископаемых, а также безопасной утилизации геологических объектов.

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей.

Тематические направления журнала «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов»:

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов и вопросы геоэкологии
- Инженерная геология Евразии и окраинных морей

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях.

Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (слепое) рецензирование.

Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах www.elibrary.ru, scholar.google.com



**TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY**

ISSN (print) – 2500_1019
ISSN (on_line) – 2413_1830

**BULLETIN
OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY
GEO ASSETS ENGINEERING**

Volume 334, № 1, 2023

Tomsk Polytechnic University Publishing House
2023

EDITORIAL BOARD

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)
Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)
Belozеров V.B., Dr. Sc. (Russia)
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)
Silkin V.M., PhD (Spain)
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
Teipel U., Dsc (Germany)
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)
Aleksenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)
Rui D., PhD (Portugal)
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)
Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Lotov V.A., Dr. Sc. (Russia)
Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)
Bouzник V.M, Dr. Sc. (Russia)
Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)
Antipenko V.R., Dr. Sc. (Russia)
Golik V.I., Dr. Sc. (Russia)
Abutalipova E.M., Dr. Sc. (Russia)
Polishchuk V.I., Dr. Sc. (Russia)
Khamitov R.N., Dr. Sc. (Russia)
Zyuzev A.M., Dr. Sc. (Russia)
Tretiak A.Ya., Dr. Sc. (Russia)
Arbuzov S.I., Dr. Sc. (Russia)
Kovalev V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Romanenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., Cand. Sc. (Russia)
Strokova L.A., Dr. Sc. (Russia)
Mazurov A.K., Dr. Sc. (Russia)
Boyarko G.Yu., Dr. Sc., Cand. Sc. (Russia)
Strizhak P.A., Dr. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

AIMS AND SCOPES

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is peer-reviewed journal owned by Tomsk Polytechnic University.

The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 2413-1830) and nationally (Certificate PE no. FM 77-65008, March 04, 2016 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications).

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

The journal publishes research papers in the field defined as "life cycle of georesources". It presents original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in geology, exploration and extraction of mineral resources, transportation technologies and deep processing of natural resources, energy-efficient production and energy conversion based on mineral resources as well as on safe disposal of geo assets.

The journal will be of interest to geologists, chemists, engineers, physicists, ecologists, power engineers, specialists in storage and transportation of energy resources, IT specialists as well as to other specialists in the related fields.

Scope of the journal issue "Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering" in accordance with Geo Assets (GA) strategy includes:

- Geo Assets exploration and refining;
- Geo Assets mining and transportation;
- Geo Assets deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and Geoecology issues;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea;
- Economic and social aspects of using Geo Assets.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication. Authors are advised to suggest two potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor in Chief.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is published monthly.

The publication of manuscripts is free of charge.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Анализ распределения урана в аэрозольных выпадениях на территории города Новосибирска**
Дорохова Л.А., Юсупов Д.В., Торопов А.С., Рапута В.Ф., Павлова Л.М., Радомская В.И., Судыко А.Ф., Барановская Н.В.
- Экстракционно-атомно-абсорбционное определение золота в морских железомарганцевых образованиях после его концентрирования дибутилсульфидом в толуоле**
Блохин М.Г., Зарубина Н.В., Иванов В.В., Михайлик П.Е.
- Инженерная методика проектирования систем электроснабжения автономных энергоэффективных зданий на основе возобновляемых источников энергии**
Обухов С.Г., Давыдов Д.Ю., Белоглазкин А.О.
- Анализ альтернативной технологии приготовления и применения пачек в процессе бурения скважин**
Королев А.С., Минаев К.М., Сагитов Р.Р.
- Определение неявных нефтегазоносных песчаных интервалов методом статистически-корреляционной интерпретации данных ГИС**
Мельник И.А.
- Золото в рудах Вернинского месторождения (Иркутская область)**
Николаева А.Н., Мазуров А.К.
- Типизация терригенных пород-коллекторов с применением метода накопленной корреляции и индивидуальных вероятностных моделей на примере месторождения им. Сухарева**
Путилов И.С., Юрьев А.В., Винокурова Е.Е.
- Многолетний мониторинг мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в приземном слое воздуха зоны наблюдения Ростовской АЭС**
Бураева Е.А., Иванков Д.В., Маломыжева Н.В., Бобылев В.А., Безуглова О.С.
- Оценка упруго-прочностных свойств цементно-эпоксидных систем**
Блинов П.А., Садьков М.И.
- Количественная оценка взаимосвязей речных и грунтовых вод в бассейне Средней Оби (Западная Сибирь)**
Савичев О.Г., Лобурь Я.Н.
- Микробные сообщества Кульдурских термальных источников и их участие в накоплении микроэлементов и минералообразовании**
Лебедева Е.Г., Харитоновна Н.А., Брагин И.В., Кузьмина Т.В.
- Апробация снежной и атмогеохимической съемок для картирования ореолов рассеяния погребенной полиметаллической минерализации на примере Турунтаевского рудопроявления (Томская область)**
Гаврилов Р.Ю., Соболев И.С., Соболева Н.П., Ворошилов В.Г., Тентюков М.П.
- Комплексные добавки на основе вторичных ресурсов для модификации цементных композиций**
Копаница Н.О., Демьяненко О.В., Куликова А.А.
- Минералого-химические и структурные особенности опокаморфных опал-кристобалитовых пород как сырья для строительной индустрии**
Котляр В.Д., Терехина Ю.В.
- 7 Analysis of uranium distribution in aerosol deposits on the territory of Novosibirsk**
Dorokhova L.A., Yusupov D.V., Toropov A.S., Raputa V.F., Pavlova L.M., Radomskaya V.I., Sudyko A.F., Baranovskaya N.V.
- 19 Extraction-atomic-absorption determination of gold in marine ferromanganese formations after its concentration with dibutyl sulphide in toluene**
Blokhin M.G., Zarubina N.V., Ivanov V.V., Mikhailik P.E.
- 30 Engineering methodology for designing power-supply systems of autonomous energy efficient buildings based on renewable energy sources**
Obukhov S.G., Davydov D.Yu., Beloglazkin A.O.
- 43 Analysis of an alternative technology for preparing and applying pills in well drilling**
Korolev A.S., Minaev K.M., Sagitov R.R.
- 54 Determination of implicit oil-and-gas-bearing sand intervals by statistical-correlation interpretation of GWS data**
Melnik I.A.
- 64 Gold in ores of the Verninskoe deposit (Irkutsk region)**
Nikolayeva A.N., Mazurov A.K.
- 75 Typing of terrigenous reservoir rocks using the cumulated correlation method and individual probabilistic models on the example of the field named after Sukharev**
Putilov I.S., Yuriev A.V., Vinokurova E.E.
- 84 Results of long-term radioecological monitoring of terrestrial ecosystems in the observation zone of the Rostov NPP**
Buraeva E.A., Ivankov D.V., Malomyzheva N.V., Bobilev V.A., Bezuglova O.S.
- 97 Evaluation of elastic-strength properties of cement-epoxy systems**
Blinov P.A., Sadykov M.I.
- 106 Quantitative assessment of relations of river and ground water in the Middle Ob basin (Western Siberia)**
Savichev O.G., Lobur Ya.N.
- 116 Microbial communities of the Kuldur thermal springs and their participation in the accumulation of microelements and mineral formation**
Lebedeva E.G., Kharitonova N.A., Bragin I.V., Kuzmina T.V.
- 126 Approbation of snow and atmogeochemical surveys for mapping dispersion haloes of buried polymetallic mineralization on the example of the Turuntaevsky ore occurrence (Tomsk region)**
Gavrilov R.Yu., Sobolev I.S., Soboleva N.P., Voroshilov V.G., Tentyukov M.P.
- 136 Complex additives based on secondary resources for modification of cement composites**
Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A.
- 145 Mineral-chemical and structural features of opokamorphic opal-cristobalite rocks as raw material for the construction industry**
Kotlyar V.D., Terekhina Yu.V.

- Investigation of the impact of sulfonated refinery products on the properties of water-based drilling fluids**
Kulyashova I.N., Mamaeva O.G., Burganov S.E., Khalikov A.R., Valova Yu.V.
- 156 Исследование влияния сульфированных продуктов нефтепереработки на свойства буровых промывочных жидкостей на водной основе**
Куляшова И.Н., Мамаева О.Г., Бурганов С.Е., Халиков А.Р., Валова Ю.В.
- Геохимическая модель накопления урана в русле реки Семизбай (Северо-Казахстанская урановорудная провинция)**
Карпов А.В., Гаськова О.Л., Владимиров А.Г., Анникова И.Ю., Мороз Е.Н.
- 165 Geochemical model of uranium accumulation in the Semizbay riverbed (Northern Kazakhstan uranium ore province)**
Karpov A.V., Gaskova O.L., Vladimirov A.G., Annikova I.Yu., Moroz E.N.
- Модифицирование неавтоклавного пенобетона торфяной добавкой TMT600**
Прищепа И.А., Мостовщиков А.В., Саркисов Ю.С.
- 177 Modification of non-autoclaved foam concrete with peat additive TMT600**
Prishchepa I.A., Mostovshchikov A.V., Sarkisov Yu.S.
- Эффективность применения дыхательных клапанов при теоретически высоких давлениях их срабатывания**
Левитин Р.Е., Цыцельская В.А.
- 187 Efficiency of using breathing valves at theoretically high pressures of their operation**
Levitin R.E., Tsytselskaya V.A.
- Современные технологии отработки алмазоносных месторождений**
Анисимов К.А., Никифоров А.В.
- 196 Modern technologies of the development of diamondiferous deposits**
Anisimov K.A., Nikiforov A.V.
- Минералого-геохимические особенности рудовмещающей толщи месторождения Угахан, Бодайбинский рудный район**
Шепель Е.В., Аюпова Н.Р.
- 209 Mineralogical and geochemical features of the ore bearing strata of the Ugakhan deposit from Bodaibo ore region, Russia**
Shepel E.V., Ayupova N.R.

УДК 550.42:546.49:581.1:504.7(571.14)

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УРАНА В АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫПАДЕНИЯХ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА НОВОСИБИРСКА

Дорохова Любовь Александровна¹,
liubov.ad@yandex.ru

Юсупов Дмитрий Валерьевич²,
yusupovd@mail.ru

Торопов Андрей Сергеевич³,
trop990@gmail.com

Рапута Владимир Федотович⁴,
raputa@sscc.ru

Павлова Людмила Михайловна¹,
pav@ascnet.ru

Радомская Валентина Ивановна¹,
radomskaya@ascnet.ru

Судыко Александр Федорович⁵,
sudykoaf@yandex.ru

Барановская Наталья Владимировна⁵,
nata@tpu.ru

¹ Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
Россия, 675000, г. Благовещенск, пер. Релочный, 1.

² Амурский государственный университет,
Россия, 675027, г. Благовещенск, Игнатъевское шоссе, 21.

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, 1.

⁴ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева, 6.

⁵ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Биогеохимическая индикация (по растениям) состояния окружающей среды широко применяется в геоэкологических исследованиях территорий. Этот метод позволяет определять источники антропогенного воздействия, границы зон неаварийных выбросов крупных промышленных предприятий, включая объекты ядерно-топливного цикла. Использован комплекс экспериментальных и расчетных математических методов для оценки зоны аэрозольных выпадений U на территории в результате штатной деятельности предприятия ядерно-топливного цикла.

Цель: установить характер распределения, формы нахождения и пути миграции U в зоне влияния предприятия ядерно-топливного цикла (на примере г. Новосибирска) по данным опробования листьев тополя.

Объект: листья деревьев рода тополь (*Populus L.*) – сезонный депонирующий планшет, биомонитор, улавливающий аэрозоли из атмосферы.

Методы. Проведена биогеохимическая съемка территории. Элементный состав золы листьев тополя изучали методом инструментального нейтронно-активационного анализа. Элементный состав частиц на поверхности листьев изучали на сканирующем электронном микроскопе с рентгеноспектральным анализом. Для определения пути миграции U использовали метод автордиографии. Численный анализ пространственного распределения концентрации урана выполняли на основе соотношений баланса массы легкой примеси в приземном слое атмосферы. Полученные результаты обрабатывали с помощью описательной статистики.

Результаты. Получены данные о закономерностях распределения и путях миграции U в зоне влияния объектов ядерно-топливного цикла на территории г. Новосибирска. В северо-восточной части города выявлены высоконтрастные биогеохимические ореолы U . Установлены количественные изменения концентраций в южных направлениях атмосферных выносов U от хвостохранилища твердых радиоактивных отходов. Изучен характер распределения концентраций U по высоте кроны дерева вблизи предприятия ядерно-топливного цикла – с наветренной стороны от его промышленной площадки концентрация U в пробах листьев тополя в 2–3 раза выше, чем с подветренной. На поверхности листьев обнаружены фазы оксида U размерами от 0,5 до 6 мкм. Установлен ветровой путь поступления U .

Ключевые слова:

уран, аэрозоли, ветровой перенос, листья тополя, Новосибирск, нейтронно-активационный анализ, SEM-EDS, автордиография, математическое моделирование.

Введение

Загрязнение атмосферного воздуха и сопряженных компонентов природной среды аэрозольными примесями стало одной из ключевых экологических проблем в промышленных городах и мегаполисах [1, 2].

Уран – интенсивно мигрирующий радиоактивный химический элемент, обладающий переменной ва-

лентностью, поведение которого зависит от физико-химических особенностей природных процессов и факторов окружающей среды. Выбросы U в атмосферу обуславливают его перераспределение между воздушно-наземной, почвенной и водной средами обитания живых организмов. В почвенной среде под влиянием микробиоты возможна иммобилизация U ,

кристаллизация в биогенных минеральных фазах [3] или его ферментативное восстановление до малорастворимого уранинита [4]. Наиболее распространенными источниками поступления урана в окружающую среду являются горнодобывающая промышленность, подземные воды, удобрения, ядерные и военные объекты [5].

Радиоактивные свойства и химическая токсичность U представляют серьезную угрозу для экосистем и здоровья человека [6]. Согласно эпидемиологическим и лабораторным исследованиям [7–9], U вызывает нарушение физиологических функций организма при поступлении через дыхательную и пищеварительную системы. Небольшое количество U способно изменять баланс иммунной системы человека, оказывать нейротоксическое действие на головной мозг [10–12].

В воздушной среде уран может входить в состав мелкодисперсных техногенных аэрозолей (менее 10 мкм в диаметре) [13]. Частицы от 1 нм до 0,45 мкм считаются более подвижными, чем частицы >0,45 мкм [14]. Аэрозольные частицы, в зависимости от диаметра, могут задерживаться в различных отделах дыхательных путей – частицы размером 1–5 мкм могут достигать периферических ветвей бронхов; частицы размером 0,2–1 мкм попадают в легкие [15] и затем в кровь и лимфу. Поэтому изучение урансодержащих

техногенных аэрозолей весьма актуально из-за связанных с ним рисков для здоровья населения.

В настоящее время проводятся работы по изучению связей минералого-геохимических особенностей урансодержащих пород и продуктов их выветривания с их радиологическими показателями и оценке медико-биологических последствий и рисков для населения, проживающего в районах с высокой естественной радиацией [16–18]. Однако о биогеохимическом мониторинге содержания U в аэрозолях сообщается редко. Исследование направлено на определение форм нахождения, характера распределения и путей миграции U в составе техногенных аэрозолей на территории мегаполиса (на примере г. Новосибирска).

Описание района исследований

Новосибирск – третий по численности населения город в России, один из наиболее экономически развитых промышленных городов Западной Сибири, который характеризуется радиационно-дестабилизированной окружающей средой. По данным аэро-гамма-спектрометрической съемки, проведенной государственным геологическим предприятием «Березовгеология» в 1988 г., на правобережной части г. Новосибирска выделены площади с контрастными гамма-аномалиями природного и техногенного радиоактивного воздействия (рис. 1).

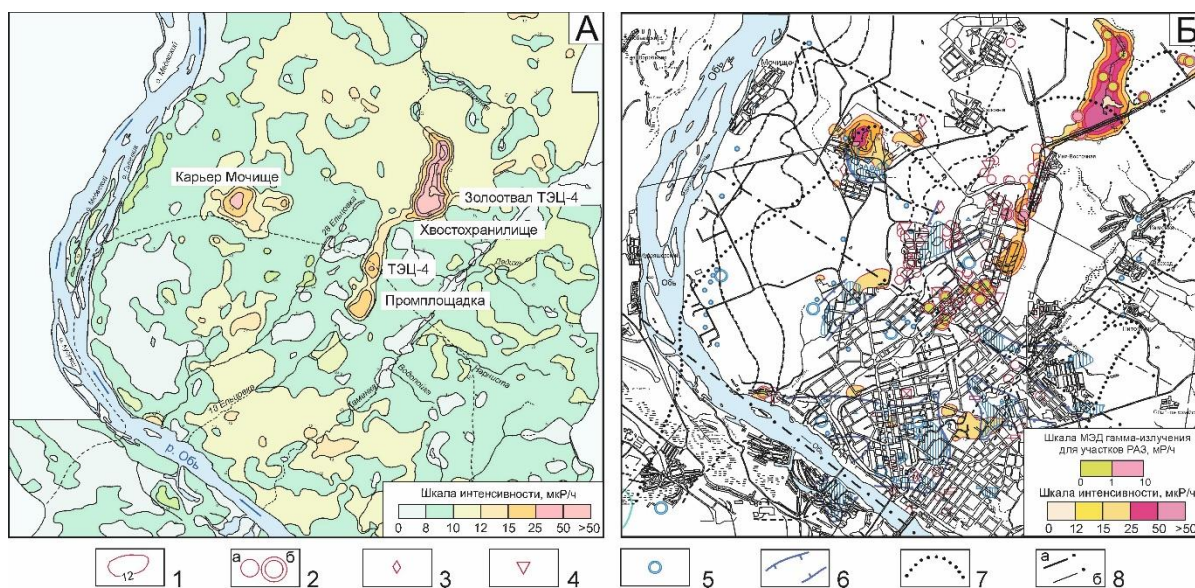


Рис. 1. Картограммы аэро-гамма поля (А) и радиационной обстановки (Б) правобережной части территории Новосибирска (по материалам ФГУП «Березовгеология»): 1 – участки с повышенной мощностью экспозиционной дозы внешнего гамма-излучения; 2 – участки радиоактивного загрязнения дезактивированные (а), не дезактивированные (б); 3 – повышенные концентрации естественных радионуклидов в строительных материалах; 4 – отходы ядерного производства; 5 – месторождения радоновых вод; 6 – радоноопасные зоны; 7 – контур палеозойских гранитов с повышенным содержанием естественных радионуклидов; 8 – тектонические разломы крупные (а), прочие (б)

Fig. 1. Maps of aero gamma field (A) and radiation situation (B) of the right-bank part territory area of Novosibirsk (according to FSUE «Berezovgeology»): 1 – areas with increased external gamma exposure dose rate; 2 – areas of radioactive contamination decontaminated (a), non-decontaminated (b); 3 – increased concentrations of natural radionuclides in building materials; 4 – waste productions; 5 – radon water deposits; 6 – radon hazardous zones; 7 – contour of Paleozoic granites with increased content of natural radionuclides; 8 – tectonic faults large (a), other (b)

Естественные источники радиоактивности связаны с выходами на дневную поверхность в районах карьеров верхнепалеозойско-раннемезозойских интрузий приобского и барлакского гранитоидных комплексов, характеризующихся высоким содержанием естественных радионуклидов [19]. Ведущая роль в структуре доз облучения населения г. Новосибирска приходится на природные источники ионизирующего излучения за счет облучения Rn и дочерними продуктами его распада. Основными источниками Rn являются специализированные на U высокорadioактивные граниты, проявляющие урановую минерализацию, радоновые воды.

Площади с техногенным радиоактивным воздействием связаны главным образом с функционированием промышленных объектов ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), которые располагаются на правом берегу реки Оби. Здесь локализуются жилые (включая отдельные участки общественно-делового использования) и рекреационные зоны, а на северо-востоке – в промышленной зоне – расположен завод по производству топлива для АЭС и исследовательских реакторов.

В состав предприятия входит промышленная площадка с основным и вспомогательными производствами и территория хвостохранилища. Вопрос, связанный с радиоактивными аэрозольными неаварийными выбросами от этого предприятия в г. Новосибирске, обсуждался ранее в научной печати [20, 21].

Низкоуровневые радиоактивные отходы предприятия в виде пульпы гидротранспортом передавались в пруд-отстойник овражно-балочного типа. Пруд-отстойник был предназначен для разделения на твердую и жидкую фазы и являлся частью технологического процесса обезвреживания радиоактивных отходов [22, 23]. В донных отложениях в тальвеге заболоченного лога, севернее хвостохранилища, выявлена протяженная геохимическая аномалия U [24]. В настоящее время выполняется комплекс работ по выводу из эксплуатации хвостохранилища. До 2030 г.

планируется осушить пруд-отстойник и засыпать экранирующим слоем золошлаковых отходов. Прогнозируется снижение радиационного воздействия гамма-излучения [25].

Природные и техногенные факторы воздействия на окружающую среду в районе исследований наслаиваются и разделить источники поступления U весьма сложно.

Отбор проб и пробоподготовка

Объектом исследования служили листья деревьев рода тополь (*Populus L.*). Древесная растительность рода тополь широко используется для озеленения жилых и промышленных зон городов России, что позволяет проводить пробоотбор по относительно равномерной сети. Листья тополей являются биомонитором, пассивным планшетом, улавливающим и задерживающим аэрозольные примеси из атмосферы [26].

К преимуществам листовой пластинки тополя как объекта биогеохимических исследований относятся морфологические и анатомические особенности строения: наличие на поверхности клейкого воска, двустороннее расположение устьиц, шероховатая поверхность и относительно большая площадь. По сравнению с другими видами древесной растительности тополь характеризуется наибольшей удельной пылеемкостью и устойчивостью к некоторым загрязнителям, а элементный состав вегетативной массы рекомендуется использовать для определения геохимических особенностей промышленно-урбанизированных территорий [27–30].

Биогеохимические исследования проведены на территории Новосибирска в начале сентября 2014 и 2017 гг. В 2014 г. отобрано 32 пробы на большей части территории города по регулярной сети 4×4 км, в 2017 г. более детально обследовали участки на территории правобережья – 38 проб по сети 1×1 км с локальным сгущением до 0,5×0,5 км. Схема отбора представлена на рис. 2.

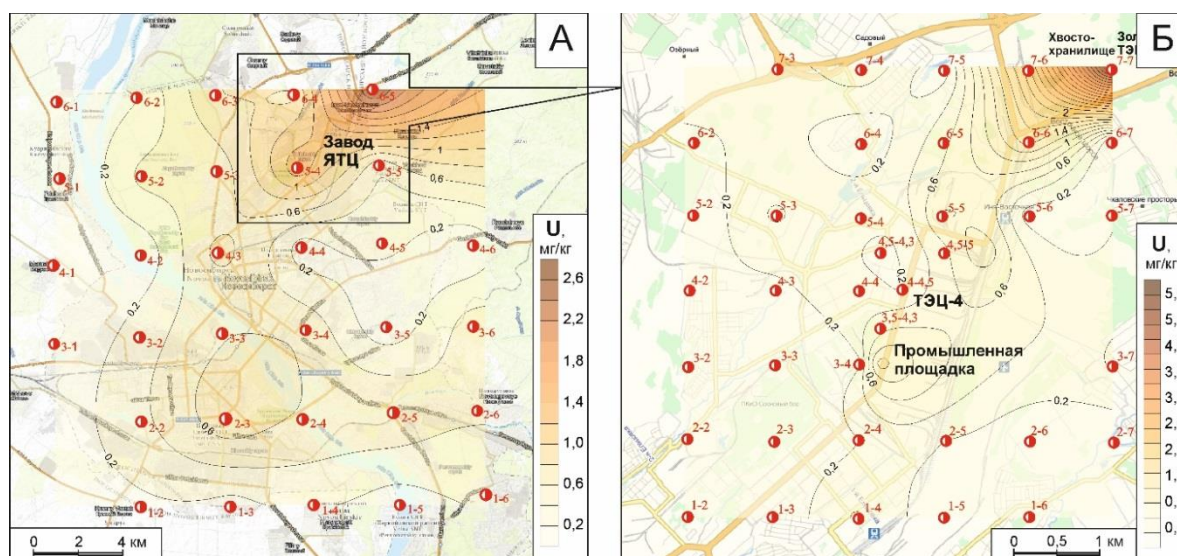


Рис. 2. Биогеохимические ореолы U на территории г. Новосибирска в 2014 г. (А) и 2017 г. (Б). Красные пунсоны – точки отбора проб и их номера [28]

Fig. 2. Biogeochemical halos of uranium concentration in ash from poplar leaves in Novosibirsk in 2014 (A) and 2017 (B). Red punsons – sampling points and their numbers [28]

Для изучения распределения урана по кроне дерева проводили отбор проб листьев с отдельно стоящего дерева по вертикальному профилю кроны (от 2 до 15 м от поверхности земли с интервалом через 1 м). Пробы отбирали с помощью автовышки с западной (подветренной) и восточной (наветренной) сторон относительно направления господствующих ветров. Пробы весом по 100 г отбирали в течение одного дня в сухую погоду после высыхания росы, как детально описано в [28], помещали в крафт-пакеты размером 150×250 мм, затем сушили при комнатной температуре.

Для автордиографии листья сушили в гербарной папке. Листья перед аналитическими исследованиями не промывали для сохранения пылевой составляющей. Пробоподготовка образцов для количественного элементного анализа включала их сухую минерализацию согласно ГОСТ 26929-94, отбор и упаковку навески золы 100±1 мг в алюминиевую фольгу.

Методы анализа

Содержание U в золе листьев тополя определяли инструментальным нейтронно-активационным методом анализа (ИНАА) по аттестованной методике (НСАМ ВИМС № 410-ЯФ) в аккредитованной ядерно-геохимической лаборатории на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (ТПУ).

Элементный состав минеральных частиц на поверхности листьев, их морфологические особенности, распределение U по поверхности образца изучали на сканирующем электронном микроскопе (SEM) Hitachi S-3400N с приставкой Bruker XFlash 5010 для проведения энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (energy-dispersive X-ray spectroscopy – EDS) в МИНОЦ «Урановая геология» имени Л.П. Рихванова (ТПУ). Для получения информации о фазовом составе пробы по контрасту образцы исследовали при ускоряющем напряжении 20,0 kV с применением детектора обратно-рассеянных электронов (back-scattered electron – BSE) в режиме низкого вакуума (50–100 Па).

Для исследования пространственного распределения и локальной концентрации радиоактивных элементов, находящихся в составе микрочастиц и зафиксированных на поверхности листьев тополя, использовали метод беспленочной цифровой автордиографии с фосфорной пластиной высокого разрешения. Были выбраны образцы листьев с максимальным содержанием U по данным ИНАА. Люминофорный экран-планшет фиксирует и сохраняет фотолюминесцентный рисунок образцов, экспонированных аналогично классической радиографии с рентгеновской пленкой. Этим методом были проанализированы листовые пластинки, в которых по данным ИНАА фиксировались максимальные концентрации U. Точки отбора проб листьев с максимальными концентрациями U расположены по лучу регулярной сетки в направлении «северо-восток – юго-запад» (рис. 2, Б).

Образцы листьев на плотной картонной подложке помещались под полиэтиленовую пленку толщиной 5–8 мкм. Подложку с листьями накрывали фосфорной пластиной и помещали для экспозиции в светонепроницаемый бокс со свинцовым корпусом. Время экспозиции составляло от 50 до 100 часов.

Для контроля работы пластины и ориентации изображений образцов использовался стандарт – радиоактивная метка с ориентирующим рисунком. Для установления плотности распределения радиоактивных частиц с люминесцентным откликом идентифицировали все точки на фотопластине с DLU (цифровая световая единица) выше 1000. Точки, лежащие вне площади поверхности листа, учитывались как фоновые. Погрешность измерений площади фона – 10 %. Полученные изображения обрабатывали с помощью программ OptiQuant и ImageJ. Для анализа распределения радиоактивных частиц на поверхности листа использовали такие параметры, как суммарная фотолюминесценция – DLU и плотность фотолюминесценции – DLU/мм².

Для численного анализа данных биогеохимического мониторинга использовали математическую модель реконструкции поля концентрации примесей, основанную на соотношениях баланса массы легкой примеси в приземном слое атмосферы [31]:

$$q(r, \theta, S) = \frac{\theta}{r^2} e^{-\frac{S}{r}}, \quad (1)$$

где $q(r, \theta, S)$ – концентрация примеси; r – расстояние от источника; θ , S – агрегированные параметры, зависящие от величины эмиссии и высоты источника, характеристик скорости ветра и турбулентного обмена в приземном слое атмосферы.

Величина параметра θ пропорциональна эмиссии источника, значение S непосредственно зависит от высоты источника, и на значительных удалениях от него влияние данного параметра на концентрацию примеси существенно снижается. В этом случае для низких источников и сравнительно больших значений r из соотношения (1) следует приближённая формула:

$$q(r, \theta) = \frac{\theta}{r^2}. \quad (2)$$

Если положение источника необходимо уточнить, то соотношение (2) преобразуется к следующему виду:

$$q(r, \theta, R) = \frac{\theta}{(r - R)^2}, \quad (3)$$

где величина R указывает положение источника на оси r .

Оценку неизвестных параметров θ и R получили методом наименьших квадратов с использованием данных измеренных концентраций.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены данные о содержании U в золе листьев тополя на территории г. Новосибирска в 2014 и 2017 гг., средние концентрации которого составляют 0,46 и 0,58 мг/кг соответственно.

Таблица 1. Статистические параметры содержания U (мг/кг) в золе листьев тополя на территории г. Новосибирска

Table 1. Statistical parameters of uranium content (mg/kg) in ash of poplar leaves in Novosibirsk

Статистические параметры Statistical parameters	2014	2017
Среднее/Arithmetic mean ± error of the mean	0,46±0,09	0,58±0,26
Медиана/Median	0,43	0,18
Стандартное отклонение/Standard deviation	0,51	1,62
Минимум–максимум/Minimum–maximum	0,01–2,69	0,05–10,2
Коэффициент вариации Variation coefficient, %	111	280
Количество проб/Number of samples	32	38

Эти показатели превышают среднее региональное содержание (0,15 мг/кг) в 3–4 раза [32]. Максимальные концентрации U (2,69 мг/кг – в 2014 г. и 10,2 мг/кг – в 2017 г.) обнаружены в золе листьев тополя на северо-восточной окраине г. Новосибирска вдоль Восточного шоссе, на расстоянии 0,8–2,0 км от границы территории хвостохранилища. Коэффициент вариации U характеризует крайне неоднородное распределение элемента в выборках.

В 2014 г. по результатам биогеохимического мониторинга был выделен ореол рассеяния U, с максимальными концентрациями в северо-восточной части

города вблизи промышленной площадки завода ЯТЦ и его хвостохранилища, ТЭЦ-4 и золоотвала (рис. 2). На этой территории по результатам ранее проведенной снеговой съемки [21] в твердом осадке было зафиксировано пониженное значение соотношения изотопов $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$, равное 116,9 вместо природного 137,9, что говорит о техногенном источнике их поступления; и аномально низкое Th/U отношение, равное 1,6–1,9. Простираение ореола прослеживалось до 70 км в северо-восточном направлении (по розе ветров). По мере удаления от завода ЯТЦ показатель уран-уранового изотопного соотношения увеличивался, по-видимому, за счет снижения доли техногенно-обусловленного изотопа (^{235}U). В 10-километровой зоне вокруг завода ЯТЦ за счет выбросов твердых техногенных частиц сформировался ореол с содержанием U до 1 г/т [21].

Анализ ретроспективных данных и результатов биогеохимического мониторинга показал, что источники U на правобережной части территории г. Новосибирска в течение трех последних десятилетий существенно не изменились [28].

Распределение концентраций U в листьях по высоте кроны отдельно стоящего тополя в 300 м от промышленной площадки завода имеет поперечный (латеральный) характер (рис. 3).

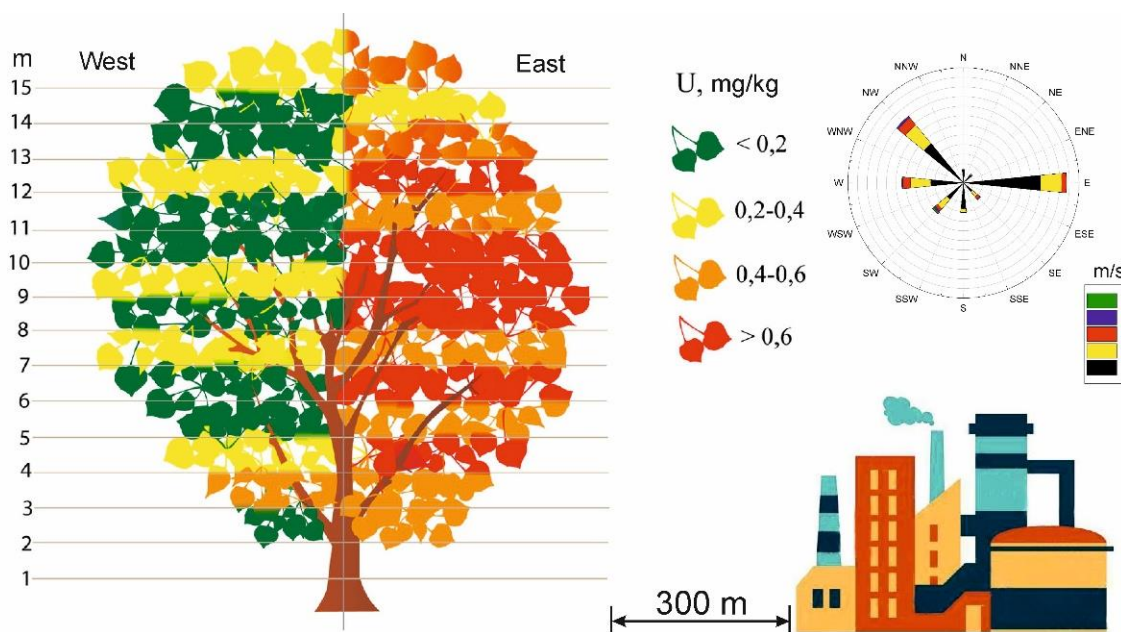


Рис. 3. Распределение U по высоте кроны дерева (мг/кг). Справа – летняя роза ветров
Fig. 3. U distribution through the tree crown height (mg/kg). The summer wind rose is on the right [20]

Содержание U в листьях с наветренной стороны по отношению к источнику в среднем в 2–3 раза выше его содержания с подветренной стороны, что подтверждает высокую пылеулавливающую способность древесной растительности. Максимальные концентрации U отмечены на высоте 4–10 м от поверхности земли. На высоте 14 м с наветренной стороны отмечено уменьшение количества U.

Полученные результаты показывают, что листья тополя служат эффективным комплексным (механическим и фитобиогеохимическим) барьером для тех-

ногенных частиц U в атмосферном воздухе. Деревья аккумулируют загрязняющие вещества намного эффективнее, чем травянистые растения, из-за различий в скорости оседания частиц. По сообщению [33] древесные растения задерживают до 75 % аэрозолей и пыли от общего объема, а травянистые – до 25 % (до четверти). Высокий барьер из зеленых насаждений (до 10 м) может снижать степень загрязнения воздушной среды на 50 %. Мелкие частицы ($d < 10$ мкм) сохраняются преимущественно в неровностях поверхности листовой пластины и в кутикулярном слое

листа. Частицы диаметром $<2,5$ мкм характеризуются наибольшей скоростью движения, как показано в [34]. Мельчайшие частицы легко задерживаются поверхностью листа, закупоривая поры и устьица.

С помощью SEM-EDS анализа на поверхности листьев тополя выявлены микрочастицы оксида U размером от 0,5 до 6 мкм (рис. 4, А, В). В частицах содержание U варьируется в пределах 30–83 %. Углерод входит в состав органического материала и частично присутствует в атмосфере камеры при изучении образцов в низком вакууме,

поэтому в расчетах не учитывался и указан как элемент деконволюции. Для уточнения элементного состава частиц U последовательно снимали два энергетических спектра – спектр частицы (рис. 4, С, Е) и спектр матрицы (рис. 4, D). Этот методический прием позволяет частично нивелировать рассеяние электронного пучка до и после взаимодействия с поверхностью исследуемого образца. Дальнейшее сравнение спектров дает возможность определить вклад матрицы в спектре интересующих частиц.

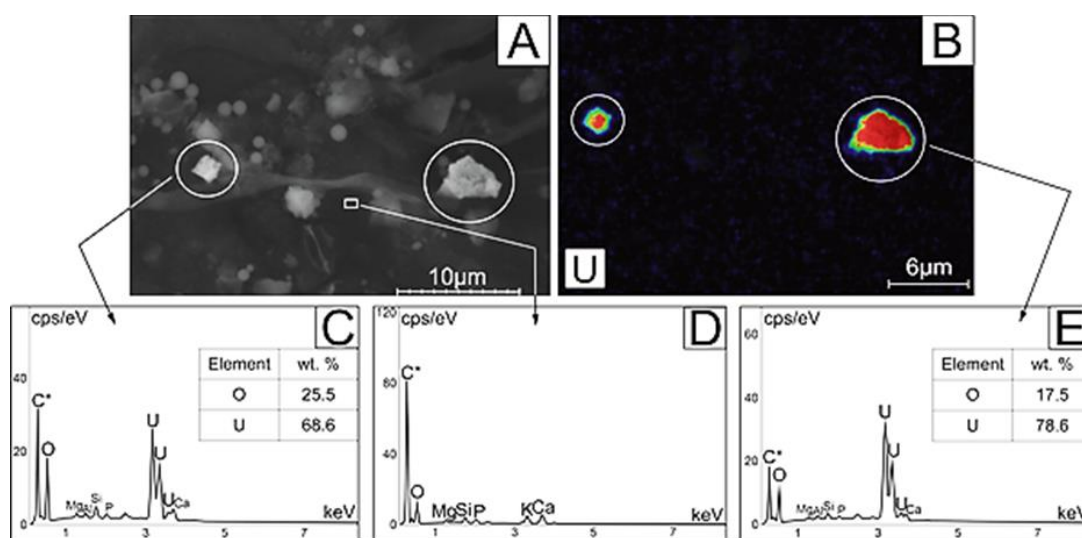


Рис. 4. Микрочастицы оксида U на поверхности листа тополя в зоне влияния хвостохранилища завода ЯТЦ (А) и их EDS-спектры (С, Е), EDS-спектр матрицы листа (D); распределение U в частицах (В)

Fig. 4. Microparticles of uranium oxide on the surface of a poplar leaf in the zone of influence of the NFC plant tailing pond (A) and their EDS-spectra (C, E), EDS-spectrum of the leaf matrix (D); uranium distribution in particles (B)

Таблица 2. Плотность распределения точек с люминесцентным откликом на поверхности листьев тополя в районе хвостохранилища завода ЯТЦ

Table 2. Density of distribution of points with a luminescent response on the poplar leaves surface in the area of the tailings of the NFC plant

Точка отбора пробы Sampling point	Количество листьев (измерений) Number of leaves (measurements)	Описание/Description	
		Количество точек Number of points	DLU/mm ² в час DLU/mm ² per hour
5-5	4	1	2000
		3–4	~1000–1200
		5–10	~200–500
		10–50	~10–20
7-6	3	1	7000
		2–3	~1000–2000
		5–7	~500–900
		10–15	~100–400
7-7	3 (6)*	1	аналогично т. 7-6 с максимумом 4000
		2–3	similar to point 7-6 with a maximum of 4000
		5–7	
		10–15	
Фон Background	10 для каждой серии экспериментов 10 for each series of experiments	1–2	~400–500
		10–20	~40–50
		10–20	~10–15

* – измерения проводились с двух сторон листа
 measurements were taken on both sides of the leaf.

Плотность распределения радиоактивных микрочастиц на поверхности листьев тополя определена методом бесплочной автордиографии (табл. 2). Были выбраны листья в точках отбора с максимальным содержанием U по результатам ИНАА.

Для точек отбора на северо-востоке г. Новосибирска отмечено максимальное превышение количества треков с высоким люминесцентным откликом на поверхности листа по сравнению с фоном. Средняя плотность частиц, рассчитанная в пределах площади листа в расчете на среднюю поверхность листа, от 10 до 30 % выше, чем плотность частиц на участках фона. Размеры таких частиц не более 20 мкм. Существенной разницы между абаксиальной (нижней) и адаксиальной (верхней) сторонами листовых пластинок не выявлено. Характерный рисунок микрочастиц с люминесцентным откликом не совпадает с анатомическим строением листа и носит рассеянный характер (рис. 5), что свидетельствует о преобладающем аэрозольном поступлении U.

В целом показано, что метод бесплочной радиогграфии может быть использован как диагностический для подтверждения природы радиоактивных частиц на поверхности биогеохимических планшетов. Расширенное использование автордиографии с эффективным экранированием альфа- или бета-излучения, применением количественных стандартов может су-

щественно улучшить качество информации о характере распределения радиоактивных частиц и даже

дать общее представление об их нуклидном составе.

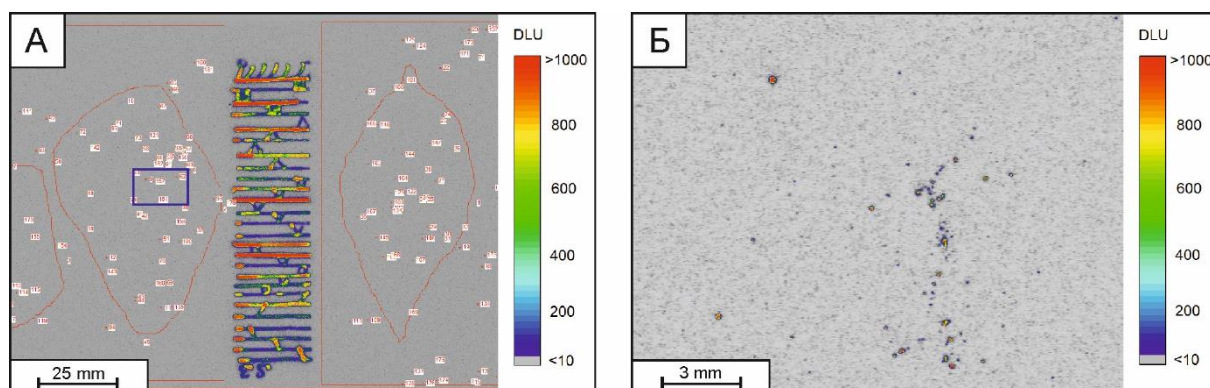


Рис. 5. Результаты автордиографии листьев тополя, отобранных на северо-восточной окраине г. Новосибирска: А) участок пластины с контрольным образцом и листьями (силуэт листьев обведен красной линией), красные точки с цифрой – точки с люминесценцией >1000 DLU; Б) участок пластины, обозначенный синим прямоугольником на рис. 2, А, с максимальной плотностью точек с люминесцентным откликом выше 1000 DLU

Fig. 5. Results of autoradiography of poplar leaves selected on the northeastern outskirts of Novosibirsk: А) section of the plate with a control sample and leaves (the silhouette of the leaves is circled with a red line), red dots with a digit – points with luminescence >1000 DLU; Б) section of the plate indicated by a blue rectangle in Fig. 2, А, with a maximum density of dots with a luminescent response above 1000 DLU

Оценивать состояние воздушного бассейна позволяют методы математического моделирования процессов рассеяния элементов с аэрозолями. Комплекс информации о выбросах загрязняющих веществ, закономерностях их рассеивания в атмосфере, объединенной в математической модели, позволяет оценить существующие уровни загрязнения и спрогнозировать динамику их развития.

По мере удаления от хвостохранилища завода ЯТЦ на юг наблюдается достаточно монотонное снижение

концентраций U в листьях тополя, что дает основание для выявления локализации источника выноса U. Для этого использовали метод численного анализа модели реконструкции полей выпадений аэрозольных примесей в виде соотношения (3) и предположение о малой высоте источника, в связи с чем использовали дополнительные опорные точки наблюдений. Такой подход был ранее успешно апробирован на ряде других объектов [31]. Численное восстановление концентраций U было проведено для двух направлений (рис. 6).

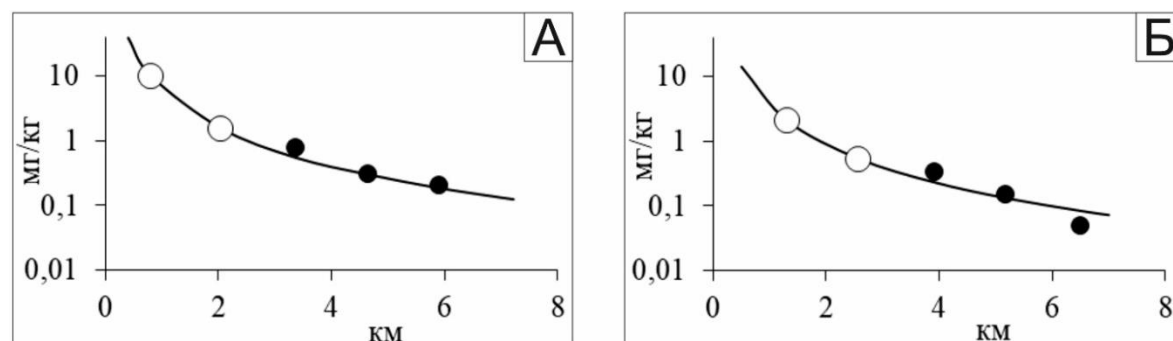


Рис. 6. Измеренные и численно восстановленные содержания U в листьях тополя в направлении 1 (А) и направлении 2 (Б); ○, ● – опорные и контрольные точки измерений, ———— – результаты моделирования

Fig. 6. Measured and numerically reconstructed U contents in poplar leaves in direction 1 (А) and direction 2 (Б); ○, ● – reference and control points of measurements; ———— – simulation results

Первое направление включало точки (7-7), (6-6), (5-5), (4-4), (3-3), опорные точки (7-7) и (6-6). Второе направление включало точки (7-6), (6-5), (5-4), (4-3), (3-2) с опорными точками (7-6) и (6-5). Для проведения оценки выноса аэрозолей U были использованы результаты измерений в опорных точках. Применительно к направлению 1 были получены следующие оценки параметров модели (3): $\theta_1=6,53$, $R_1=0,8$ км; для направления 2 – $\theta_2=3,57$, $R_2=1,31$ км. С помощью

оценки и сравнения параметров θ_1 и θ_2 установлено, что вынос U в направлении 2 в 1,8 раза ниже, чем в направлении 1; оценка параметров R_1 и R_2 показала, что точка пересечения линий направлений 1 и 2 соответствует примерному положению источника эмиссии U.

Предложенную модель реконструкции полей выпадений аэрозольных примесей можно применять для оперативного контроля атмосферных поступлений U

от наземных источников с использованием небольшого числа опорных точек биогеохимического мониторинга. В табл. 3 приведено сравнение результатов оценки по математической модели (формула (3)) с результатами измерений концентраций U на двух маршрутах наблюдений.

Таблица 3. Измеренные и рассчитанные концентрации U (мг/кг) в юго-западных направлениях выноса от хвостохранилища завода ЯТЦ

Table 3. Measured and calculated U concentrations (mg/kg) in the south-western directions of removal from the NFC plant tailings dump

Номер точки Point number	Расстояние от источника, км Distance from the source, km	Измерение/расчёт Measurement/calculation	Номер точки Point number	Расстояние от источника, км Distance from the source, km	Измерение/расчёт Measurement/calculation
(7-7)*	0,8	10,2/-	(7-6)*	1,31	2,08/-
(6-6)*	2,04	1,54/-	(6-5)*	2,57	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

* – опорные точки/reference points.

Анализ полученных данных (табл. 3) показывает достаточно высокий уровень согласия расчетов с результатами биогеохимического мониторинга в контрольных точках наблюдений. Определенные расхождения могут быть связаны с несовпадением положения источника с маршрутом отбора проб.

Комплексное использование результатов биогеохимического мониторинга, полученных аналитических измерений и математического моделирования является наиболее эффективным подходом для оценки и описания распространения загрязнителей в воздушной среде, что создает возможность для разработки и корректировки планов размещения объектов капитального строительства и проведения санитарно-гигиенических мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голохваст К.С. Нано- и микроразмерные частицы атмосферных взвесей и их экологический эффект (на примере городов юга Дальнего Востока): дис. ... д-ра биол. наук. – Владивосток, 2014. – 310 с.
2. Alemayehu Y.A., Asfaw S.L., Terfie T.A. Exposure to urban particulate matter and its association with human health risks // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – V. 24. – P. 1–16.
3. Formation and geological sequestration of uranium nanoparticles in deep granitic aquifer / Y. Suzuki, H. Mukai, T. Ishimura, T.D. Yokoyama, S. Sakata, T. Hirata, T. Iwatsuki, T. Mizuno // *Scientific Reports*. – 2016. – V. 6. – P. 1–6.
4. Bioreduction of uranium: environmental implications of a pentavalent intermediate / J.C. Renshaw, L.J.C. Butchins, F.R. Livens, I. May, J.M. Charnock, J.R. Lloyd // *Environmental science & technology*. – 2005. – V. 39 (15). – P. 5657–5660.
5. Emerging health risks and underlying toxicological mechanisms of uranium contamination: Lessons from the past two decades / M. Ma, R. Wang, L. Xu, M. Xu, S. Liu // *Environment International*. – 2020. – V. 145. – P. 106–107.
6. Remediation techniques for uranium removal from polluted environment – review on methods, mechanism and toxicology / S. Akash, B. Sivaprakash, V.C.V. Raja, R. Rajamohan, G. Muthusamy // *Environmental Pollution*. – 2022. – V. 302. – P. 1–15.
7. Uranium concentration in umbilical cord may increase the risk for orofacial clefts / Y. Guo, L. Liu, W. Nia, Y. Pana, Y. Chena, Q. Xieb, Y. Liub, L. Jina, Z. Lia, A. Rena, L. Wang // *Environmental Research*. – 2020. – V. 182. – P. 1–6.
8. Lin Y.W. Uranyl binding to proteins and structural-functional impacts // *Biomolecules*. – 2020. – V. 10. – P. 1–16.
9. Depleted uranium induces disruption of energy homeostasis and oxidative stress in isolated rat brain mitochondria / F. Shaki, M. Hosseini, M. Ghazikhansari, J. Pourahmad // *Metallomics*. – 2013. – V. 5 (6). – P. 736–744.
10. Differential response of human T-lymphocytes to arsenic and uranium / E.J. Dashner-Titus, J.R. Schilz, K.A. Simmons, T.R. Duncan, S.C. Alvarez, L.G. Hudson // *Toxicology Letters*. – 2020. – V. 333. – P. 269–278.
11. Cytoplasmic aggregation of uranium in human dopaminergic cells after continuous exposure to soluble uranyl at non-cytotoxic concentrations / A. Carmona, F. Porcaro, A. Somogyi, S. Roudeau, F. Domart, K. Medjoubi, M. Aubert, H. Isnard, A. Nonell, A. Rinzel, E. Paredes, C. Vidaud, V. Malard, C. Bresson, R. Ortega // *NeuroToxicology*. – 2021. – V. 82. – P. 35–44.

Заключение

В северо-восточной части территории г. Новосибирска (в промышленной зоне завода ЯТЦ и его хвостохранилища на окраине города) по результатам биогеохимического мониторинга выявлен ореол аэрозольного рассеяния U, среднее содержание которого превышает региональный уровень концентрации в 3–4 раза. Вертикальное распределение аэрозолей U (до 14 м) зависит от розы ветров и расположения биомонитора относительно источника выбросов – с наветренной стороны содержание U в листьях тополя выше, чем с подветренной – в 2–3 раза.

Ветровой перенос урансодержащих аэрозолей подтвержден методами электронной микроскопии, автордиографии и хорошим согласованием расчетных и экспериментальных данных по изменению концентрации U в листьях тополя расстоянием от потенциального источника его эмиссии.

Оценка состояния воздушной среды с помощью численного анализа модели реконструкции выпадения аэрозолей показала согласование измеренных концентраций U в ходе биогеохимического мониторинга и вычисленных в контрольных точках наблюдений и их распространения.

Результаты биогеохимических исследований и данные математического моделирования рассеяния U позволили установить распределение и пути миграции U, обусловленные ветровым переносом. Предложенная численная модель полей выпадений аэрозольных примесей может применяться для оперативного контроля атмосферных поступлений U от наземных источников с использованием небольшого числа опорных точек биогеохимического мониторинга.

Отбор и количественный анализ биогеохимических проб частично были выполнены в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров. Математическая обработка данных выполнялась в рамках госзадания ИВМиМГ СО РАН (0251-2021-0003). Интерпретация результатов выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 20-64-47021). Изучение форм нахождения урана на поверхности листьев методом автордиографии выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-60030.

12. Exploring the toxicology of depleted uranium with *Caenorhabditis elegans* / M. Lu, H. Li, Y. Li, Y. Lu, H. Wang, X. Wang // *ACS Omega*. – 2020. – V. 5. – P. 12119–12125.
13. Monitoring of ultra-trace uranium and thorium in six-grade particles / X. Shao, Y. Xu, Y. Zhang, L. Yin, X. Kong, Y. Ji // *Chemosphere*. – 2019. – V. 233. – P. 76–80.
14. Lind O.C., Tschiersch J., Salbu B. Nanometer-micrometer sized depleted uranium (DU) particles in the environment // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2020. – V. 211. – P. 1–8.
15. A review of biological effects and treatments of inhaled depleted uranium aerosol / Y. Ran, S. Wang, Y. Zhao, J. Li, X. Ran, Y. Hao // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2020. – V. 222. – P. 1–11.
16. Радиоэкологическая опасность для населения в районах распространения высокорadioактивных гранитов / А.Н. Злобина, Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская, И.М. Фархутдинов, Н. Ванг // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 3. – С. 111–125.
17. Distribution of radioactive and rare-earth elements in ferralsols of the Guangdong Province (China) / A.N. Zlobina, L.P. Rikhvanov, N.V. Baranovskaya, N. Wang, I.M. Farhutdinov // *Eurasian Soil Science*. – 2019. – V. 52. – № 6. – P. 644–653.
18. The nature of high soil radioactivity in Chinese Province Guangdong / L.P. Rikhvanov, A.N. Zlobina, N. Wang, I.A. Matveenko // *Procedia Chemistry*. – 2014. – V. 10. – P. 460–466.
19. Росляков Н.А., Жмодик С.М., Пахомов В.Г. Естественные радионуклиды в геологической среде Новосибирской области // *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы IV Международной конференции*. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. – С. 461–464.
20. Артамонова С.Ю. Уран в техногенных аэрозолях промышленных районов Новосибирска // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2012. – Т. 20. – № 5. – С. 507–513.
21. Артамонова С.Ю. Уран и торий в аэрозольных выпадениях г. Новосибирска и его окрестностей (Западная Сибирь) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 212–223.
22. Геохимическое моделирование поведения урана в подземных водах вблизи шламохранилищ при биоремедиации / А.В. Сафонов, А.Е. Богуславский, К.А. Болдырев, О.Л. Гаськова, О.С. Наймушина, Н.М. Попова // *Геохимия*. – 2021. – Т. 66. – № 1. – С. 63–72.
23. Биогенные факторы формирования геохимических урановых аномалий в районе шламохранилища Новосибирского завода химконцентратов / А.В. Сафонов, А.Е. Богуславский, К.А. Болдырев, Л.В. Зайцева // *Геохимия*. – 2019. – Т. 64. – № 6. – С. 644–650.
24. Богуславский А.Е. Формирование вторичных геохимических аномалий в зоне воздействия пунктов хранения РАО (на примере хвостохранилища ПАО «НЗХК») // *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы V Международной конференции*. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. – С. 129–133.
25. Отчёт по экологической безопасности ПАО «НЗХК» за 2020 год // Новосибирский завод химконцентратов: официальный сайт. – Новосибирск, 2021. URL: <http://www.nccp.ru/press/archiv/econccp-2020.pdf> (дата обращения: 10.07.2022).
26. Дорохова Л.А., Юсупов Д.В., Рихванов Л.П. Геохимические и минералогические индикаторы ветровой дефляции на урбанизированных территориях с использованием листьев тополя // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 137–146.
27. Ташекова А.Ж., Торопов А.С. Использование листьев растений как биогеохимических индикаторов состояния городской среды // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 114–124.
28. Юсупов Д.В. Методология биогеохимической индикации урбанизированных и горнопромышленных территорий на основе анализа древесной растительности: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 344 с.
29. Rare earth elements in poplar leaves as indicators of geological environment and technogenesis / D.V. Yusupov, N.V. Baranovskaya, Yu.V. Robertus, V.V. Radomskaya, L.M. Pavlova, A.F. Sudyko, L.P. Rikhvanov // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – V. 27. – P. 27111–27123.
30. Дорохова Л.А. Биогеохимическая индикация влияния алюминиевого и уранодобывающего производств на прилегающие территории по данным изучения листьев тополя: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 19 с.
31. Экспериментальные исследования и численный анализ процессов атмосферных выносов урана с территорий хвостохранилищ / В.Ф. Рапута, Д.В. Юсупов, Т.В. Ярославцева, Л.А. Дорохова // *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы VI Международной конференции*. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. – Т. 1. – С. 499–503.
32. 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.
33. Assessment of the ability of roadside vegetation to remove particulate matter from the urban air / B. Kończak, M. Cempa, Ł. Pierzchała, M. Deska // *Environmental Pollution*. – 2020. – V. 268. – P. 1–36.
34. Freer-Smith P.H., Beckett K.P., Taylor G. Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* × *trichocarpa* 'Beaupré', *Pinus nigra* and × *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment // *Environmental Pollution*. – 2005. – V. 113. – P. 157–167.

Поступила 05.08.2022 г.

Прошла рецензирование 18.11.2022 г.

Информация об авторах

Дорохова Л.А., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института геологии и природопользования ДВО РАН.

Юсупов Д.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии и природопользования Амурского государственного университета.

Торопов А.С., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории дозиметрии и радиоактивности окружающей среды кафедры радиохимии химического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова.

Рапута В.Ф., доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

Павлова Л.М., кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института геологии и природопользования ДВО РАН.

Радомская В.И., кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института геологии и природопользования ДВО РАН.

Судыко А.Ф., инженер отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Барановская Н.В., доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.42:546.49:581.1:504.7(571.14)

ANALYSIS OF URANIUM DISTRIBUTION IN AEROSOL DEPOSITS ON THE TERRITORY OF NOVOSIBIRSK

Lyubov A. Dorokhova¹,
liubov.ad@yandex.ru

Dmitry V. Yusupov²,
yusupovd@mail.ru

Andrey S. Toropov³,
trop990@gmail.com

Vladimir F. Raputa⁴,
raputa@sscc.ru

Lyudmila M. Pavlova¹,
pav@ascnet.ru

Valentina I. Radomskaya¹,
radomskaya@ascnet.ru

Alexander F. Sudyko⁵,
sudykoaf@yandex.ru

Natalia V. Baranovskaya⁵,
nata@tpu.ru

¹ Institute of Geology & Nature Management FEB RAS,
1, Relochniy lane, Blagoveshchensk, 675000, Russia.

² Amur State University,
21, Ignatievskoe highway, Blagoveshchensk, 675027, Russia.

³ Lomonosov Moscow State University,
GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia.

⁴ Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
6, Akad. Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

⁵ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Biogeochemical indication (by plants) of the state of the environment is widely used in geoecological studies of territories. It allows identifying the sources of anthropogenic impact, the boundaries of the zone of non-accidental emissions of large industrial enterprises, including nuclear fuel cycle facilities. A complex of laboratory and mathematical methods was used to estimate U aerosol deposition on the urbanized territory as a result of the regular activity of the nuclear fuel cycle enterprise.

The aim of the research is to establish the nature of distribution, forms of location and pathways of migration of uranium in the zone of influence of the nuclear fuel cycle enterprise (on the example of Novosibirsk) according to the sampling of poplar leaves.

Methods. Biogeochemical survey of the territory was carried out. The elemental composition of poplar leaf ash was studied by instrumental neutron activation analysis. The elemental composition of particles on the leaf surface was studied using a scanning electron microscope with X-ray spectral analysis. U migration pathway was determined by autoradiography. Numerical analysis of the spatial distribution of uranium concentration was performed based on the mass balance ratios of a light impurity in the surface layer of the atmosphere. The results obtained were processed using descriptive statistics.

Results. The data on the distribution patterns and migration pathways of U in the zone of influence of nuclear fuel cycle facilities in the territory of Novosibirsk were obtained. Highly contrasting biogeochemical halos of U were identified in the northeastern part of the city. Quantitative changes of U concentrations in the southern directions of atmospheric U removal from the solid radioactive waste tailing pond were determined. The character of distribution of U concentrations over the height of tree crowns in the vicinity of the nuclear fuel cycle enterprise was studied – on the windward side from its industrial site the U concentration in samples of poplar leaves is 2–3 times higher than on the leeward side. Mineral phases of U oxide with sizes from 0,5 to 6 microns were fixed on the leaves surface. The windward pathway of U entry was established.

Key words:

uranium, aerosols, wind transport, poplar leaves, Novosibirsk, neutron activation analysis, SEM-EDS, autoradiography, mathematic modeling.

Selection and quantitative analysis of biogeochemical samples were partially performed as part of the program for increasing TPU competitiveness among the world's leading research centers. Mathematical data processing was carried out within the framework of the state task for ICMMG SB RAS (no. 00251-2021-0003). The interpretation of the results – within the framework of the grant of the Russian Science Foundation (project no. 20-64-47021). The study of the uranium forms on the leaves surface using by autoradiography was supported by the RFBR, project no. 19-33-60030.

REFERENCES

1. Golohvast K.S. *Nano- i mikrorazmernye chastitsy atmosferykh vzvesey i ikh ekologicheskiy effekt (na primere gorodov yuga Dalnego Vostoka)*. Dis. Dokt. nauk [Nano- and micro-sized particles of atmospheric suspension and their environmental effects (by example of cities in the South of the Far East)]. Dr. Diss.]. Vladivostok, 2014. 310 p.
2. Alemayehu Y.A., Asfaw S.L., Terfie T.A. Exposure to urban particulate matter and its association with human health risks. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 24, pp. 1–16.

3. Suzuki Y., Mukai H., Ishimura T., Yokoyama T.D., Sakata S., Hirata T., Iwatsuki T., Mizuno T. Formation and geological sequestration of uranium nanoparticles in deep granitic aquifer. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, pp. 1–6.
4. Renshaw J.C., Butchins L.J.C., Livens F.R., May I., Charnock J.M., Lloyd J.R. Bioreduction of uranium: environmental implications of a pentavalent intermediate. *Environmental science & technology*, 2005, vol. 39 (15), pp. 5657–5660.
5. Ma M., Wang R., Xu L., Xu M., Liu S. Emerging health risks and underlying toxicological mechanisms of uranium contamination: lessons from the past two decades. *Environment International*, 2020, vol. 145, pp. 106–107.
6. Akash S., Sivaprakash B., Raja V.C.V., Rajamohan R., Muthusamy G. Remediation techniques for uranium removal from polluted environment – review on methods, mechanism and toxicology. *Environmental Pollution*, 2022, vol. 302, pp. 1–15.
7. Guo Y., Liu L., Nia W., Pana Y., Chen A., Xie Q., Liub Y., Jina L., Lia Z., Rena A., Wang L. Uranium concentration in umbilical cord may increase the risk for orofacial clefts. *Environmental Research*, 2020, vol. 182, pp. 1–6.
8. Lin Y.W. Uranyl binding to proteins and structural-functional impacts. *Biomolecules*, 2020, vol. 10, pp. 1–16.
9. Shaki F., Hosseini M., Ghazikhansari M., Pourahmad J. Depleted uranium induces disruption of energy homeostasis and oxidative stress in isolated rat brain mitochondria. *Metallomics*, 2013, vol. 5, no. 6, pp. 736–744.
10. Dashner-Titusa E.J., Schilzb J.R., Simmons K.A., Duncana T.R., Alvarez S.C., Hudson L.G. Differential response of human T-lymphocytes to arsenic and uranium. *Toxicology Letters*, 2020, vol. 333, pp. 269–278.
11. Carmona A., Porcaro F., Somogyi A., Roudeau S., Domart F., Medjoubi K., Aubert M., Isnard H., Nonell A., Rincel A., Paredes E., Vidaud C., Malard V., Bresson C., Ortega R. Cytoplasmic aggregation of uranium in human dopaminergic cells after continuous exposure to soluble uranyl at non-cytotoxic concentrations. *Neurotoxicology*, 2021, vol. 82, pp. 35–44.
12. Lu M., Li H., Li Y., Lu Y., Wang H., Wang X. Exploring the toxicology of depleted uranium with *Caenorhabditis elegans*. *ACS Omega*, 2020, vol. 5, pp. 12119–12125.
13. Shao X., Xu Y., Zhang Y., Yin L., Kong X., Ji Y. Monitoring of ultra-trace uranium and thorium in six-grade particles. *Chemosphere*, 2019, vol. 233, pp. 76–80.
14. Lind O.C., Tschiersch J., Salbu B. Nanometer-micrometer sized depleted uranium (DU) particles in the environment. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 211, pp. 1–8.
15. Ran Y., Wang S., Zhao Y., Li J., Ran X., Hao Y. A review of biological effects and treatments of inhaled depleted uranium aerosol. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 222, pp. 1–11.
16. Zlobina N.A., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Farkhutdinov I.M., Wang N. Radioecological hazard for the population living in the regions with high radioactive granites. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 3, pp. 111–125. In Rus.
17. Zlobina A.N., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Wang N., Farhutdinov I.M. Distribution of Radioactive and Rare-Earth Elements in Ferralols of the Guangdong Province (China). *Eurasian Soil Science*, 2019, vol. 52, no. 6, pp. 644–653.
18. Rikhvanov L.P., Zlobina A.N., Wang N., Matveenko I.A. The Nature of High Soil Radioactivity in Chinese Province Guangdong. *Procedia Chemistry*, 2014, vol. 10, pp. 460–466.
19. Roslyakov N.A., Zhmodik S.M., Pakhomov V.G. Estestvennye radionuklidy v geologicheskoy srede Novosibirskoy oblasti [Natural radionuclides in the geological environment of the Novosibirsk region]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka. Materialy IV Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in environment. Proc. of IV International conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2013, pp. 461–464.
20. Artamonova S.Yu. Uran v tekhnogenykh aerolyakh promyshlennykh rayonov Novosibirsk [Uranium in technogenic aerosols from industrial areas of Novosibirsk]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2012, vol. 20, no. 5, pp. 507–513.
21. Artamonova S.Yu. Uranium and thorium in aerosol fallout of Novosibirsk city and its vicinity (West Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 212–223. In Rus.
22. Safonov A.V., Popova N.M., Boguslavsky A.E., Gaskova O.L., Naimushina O.S., Boldyrev K.A. Geochemical modeling of the uranium behavior in groundwater near the sludge storages during bioremediation. *Geochemistry International*, 2021, vol. 59, no. 1, pp. 56–65.
23. Safonov A.V., Boguslavskii A.E., Boldyrev K.A., Zayceva L.V. Biogenic factors of formation of geochemical uranium anomalies near the sludge storage of the Novosibirsk chemical concentrate plant. *Geochemistry International*, 2019, vol. 57, no. 6, pp. 709–715.
24. Boguslavskiy A.E. Formirovaniye vtorichnykh geokhimicheskikh anomalii v zone vozdeystviya punktov khraneniya RAO (na primere khvostokhranilishcha PAO «NZKHK») [Formation of secondary geochemical anomalies in the impact zone of RW storage facilities (by the example of PJSC NCCP tailings pond)]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka. Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in environment. Proc. of V International conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2016, pp. 129–133.
25. Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti PAO «NZKHK» za 2020 god [Environmental Safety Report of PJSC «NCCP» for 2020]. *Novosibirskiy zavod khimkontsentratov*. Novosibirsk, 2021. Available at: <http://www.nccp.ru/press/archiv/> (accessed 10 July 2022).
26. Dorokhova L.A., Yusupov D.V., Rikhvanov L.P. Geochemical and mineral indicators of deflation in urban areas using poplar leaves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 33, no. 11, pp. 137–146. In Rus.
27. Tashekova Ah.Zh., Toropov A.S. Application of leaves as bioindicators of urban environment state. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 114–124. In Rus.
28. Yusupov D.V. *Metodologiya biogeokhimicheskoy indikatsii urbanizirovannykh i gornopromyshlennykh territoriy na osnove analiza drevnesnoy rastitelnosti*. Diss. Dokt. nauk [Methodology of biogeochemical indication of urbanized and mining areas based on analysis of woody vegetation. Dr. Diss.] Tomsk, 2020. 344 p.
29. Yusupov D.V., Baranovskaya N.V., Robertus Yu.V., Radomskaya V.V., Pavlova L.M., Sudyko A.F., Rikhvanov L.P. Rare earth elements in poplar leaves as indicators of geological environment and technogenesis. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 27111–27123.
30. Dorokhova L.A. *Biogeokhimicheskaya indikatsiya vliyaniya aluminievogo i uranodobyvayushchego proizvodstv na prilagayushchie territorii po dannym izucheniya listev topolya*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Biogeochemical indication of the impact of aluminum and uranium mining on adjacent areas based on the study of poplar leaves. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2022. 19 p.
31. Raputa V.F., Yusupov D.V., Yaroslavtseva T.V., Dorokhova L.A. Eksperimentalnye issledovaniya i chislenny analiz protsessov atmosferynykh vynosov urana s territoriy khvostokhranilishch [Experimental studies and numerical analysis of atmospheric processes of uranium removal from tailings]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka. Materialy VI Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in environment. Proc. of VI International conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2021. Vol. 1, pp. 499–503.
32. Yusupov D.V., Rikhvanov L.P., Sudyko A.F., Baranovskaya N.V., Dorokhova L.A. Radioactive elements (thorium, uranium) in the poplar leaves on urban areas and their indicator role. *Prospect and protection of mineral resources*, 2019, no. 2, pp. 61–68. In Rus.
33. Kończak B., Cempa M., Pierzchała Ł., Deska M. Assessment of the ability of roadside vegetation to remove particulate matter from the urban air. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 268 (Pt B), pp. 1–36.
34. Freer-Smith P.H., Beckett K.P., Taylor G. Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoids* × *tricarpa* ‘Beaupré’, *Pinus nigra* and × *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environmental Pollution*, 2005, vol. 113, pp. 157–167.

Received: 5 August 2022.

Reviewed: 18 November 2022.

Information about the authors

Lyubov A. Dorokhova, Cand. Sc., research scientist, Institute of Geology & Nature Management FEB RAS.

Dmitry V. Yusupov, Dr. Sc., professor, Amur State University.

Andrey S. Toropov, Cand. Sc., senior researcher, Lomonosov Moscow State University.

Vladimir F. Raputa, Dr. Sc., chief researcher, Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS.

Lyudmila M. Pavlova, Cand. Sc., leading researcher, Institute of Geology & Nature Management FEB RAS.

Valentina I. Radomskaya, Cand. Sc., leading researcher, Institute of Geology & Nature Management FEB RAS.

Alexander F. Sudyko, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Natalia V. Baranovskaya, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 543.421

ЭКСТРАКЦИОННО-АТОМНО-АБСОРБЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОЛОТА В МОРСКИХ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ ПОСЛЕ ЕГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ДИБУТИЛСУЛЬФИДОМ В ТОЛУОЛЕ

Блохин Максим Геннадьевич¹,
blokhin@feji.ru

Зарубина Наталья Владимировна¹,
zarubina@feji.ru

Иванов Владимир Викторович¹,
d159327@yandex.ru

Михайлик Павел Евгеньевич¹,
mikhailik@feji.ru

¹ Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью наработки методических решений по количественному определению содержания золота в железомарганцевых образованиях и других геологических объектах в связи с существующими здесь химико-аналитическими трудностями и недостаточным количеством стандартных образцов состава железомарганцевых образований с надежно аттестованным содержанием в них золота.

Цель: проверка применимости методики экстракции золота с использованием нефтесульфидов (дibuтилсульфида в толуоле) к определению золота в железомарганцевых образованиях с электротермическим атомно-абсорбционным окончанием, наряду с методикой извлечения золота его соосаждением с теллуром.

Объекты: пробы железомарганцевых образований из различных районов северной части Тихого океана, а также российский стандартный образец состава с аттестованным содержанием золота ООПЕ 603 (СДО-6) и стандарт Геологической службы США NOD-A-1.

Методы. Проведено концентрирование золота при его определении в железомарганцевых образованиях по методикам экстракции дibuтилсульфидом в толуоле и соосаждением с теллуром и электротермическим атомно-абсорбционным анализом. Обработка полученных результатов проведена с применением методов математической статистики.

Результаты. Методика экстракции золота с дibuтилсульфидом в толуоле показала свое преимущество для целей анализа железомарганцевых образований, по сравнению с процедурой соосаждения с теллуром, в связи с ее высокой селективностью, позволяющей избавляться от влияния матричных компонентов, в первую очередь железа, формирующего мешающее наложение спектральных линий при атомно-абсорбционном определении золота. Методика экстракции золота с дibuтилсульфидом была апробирована для анализа образцов железомарганцевых образований из различных районов северной части Тихого океана, а также стандартных образцов состава железомарганцевых образований – российском ООПЕ 603 (СДО-6) и американском стандарте NOD-A-1. Использование воздушносухой навески 2 г образца дало удовлетворительный результат при анализе стандартного образца СДО-6 с аттестованным содержанием золота 10 ± 6 нг/г, но не позволило успешно проанализировать образец NOD-A-1, для которого были получены невоспроизводимые результаты. В этой связи для определения в данном стандарте золота рекомендуется использование еще больших навесок. Атомно-абсорбционное определение золота в изученных образцах железомарганцевых образований по предлагаемой методике показало результаты, отвечающие требованиям геохимического анализа, в том числе и по сравнению с ИСП-МС методом. Однако проведенное ранее электронно-микроскопическое исследование железомарганцевых корок северо-западной части Тихого океана выявило присутствие в них частиц самородного золота, что может, в свою очередь, вызывать методические сложности в процессе отбора представительной пробы и в процедуре подготовки образцов железомарганцевых образований к анализу.

Ключевые слова:

Атомно-абсорбционный анализ, золото, экстракция, дibuтилсульфид, «эффект самородка», железомарганцевые образования, стандартные образцы состава.

Введение

Точное количественное определение содержания золота (Au) в железомарганцевых образованиях (ЖМО) Мирового океана важно как для понимания геохимических процессов генезиса этих отложений, так и для формирования представления о перспективности ЖМО в качестве потенциального золотоносного минерального сырья. Анализ этого элемента в ЖМО проблематичен в связи с его низким содержанием, большой неоднородностью и помехами со стороны матричных элементов, присутствующих в ЖМО в высо-

ких концентрациях. Также в настоящее время имеется лишь несколько стандартных образцов состава (СОС) ЖМО, как отечественных, так и зарубежных, с достоверно аттестованным содержанием в них золота [1].

Таким образом, наработка методических решений по определению содержания золота в ЖМО и других геологических пробах является актуальной задачей и на сегодняшний день, несмотря на многочисленное количество работ, посвященных данной тематике и многолетнее изучение этого вопроса рядом исследователей [2–8 и др.].

Наиболее широко для этого используются несколько методов, таких как инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА), масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС) и атомно-абсорбционная спектроскопия (ААС), сопровождаемых различными вариантами пробоподготовки к анализу [9].

Для снижения предела определения золота в ЖМО и устранения влияния элементов матрицы в химико-аналитическом наборе методик, предполагающих разложение проб, применяют ряд подходов, связанных с предварительным отделением от матрицы и выделением золота до стадии непосредственного инструментального определения. С этой целью используются различные методики разделения и концентрирования, описанные в литературе, такие как: применение колонок для предварительного концентрирования на основе янтарных смол или активированного угля [10, 11], использование сорбентов из протеин-обогащенной биомассы [12], сорбционное концентрирование на анионите Dowex-1×8 [1], экстракция метилизобутилкетона [13], микроэкстракция 1,5-дифенил-1,3,5-пентантрионом в качестве хелатирующего агента [14] и ряд других. В настоящее время особое внимание уделяется бесцианидной экстракции золота, и здесь может успешно применяться N-бромсукцинимид [15].

Метод пробирной плавки также по-прежнему широко применяется в аналитической практике и зачастую считается эталонным методом прецизионного определения содержания золота [16–18]. Это метод может иметь различные инструментальные окончания, чаще всего ИСП-МС, ИСП-АЭС, РФА и ААС [19], но встречаются и другие варианты, например, УФ-спектрофотометрия [20].

Основных причин, по которым пробирный анализ считается надежным методом определения золота в геохимических исследованиях, несколько: (1) предполагается, что это метод «полного» разложения пробы и (2) большая представительность пробы, по сравнению с другими методами. Размер навески в пробирном анализе обычно составляет от 30 до 50 г и эффективно снижает риск «эффекта самородка» (англ. «nugget effect») [17].

Этот эффект можно описать как явление, обнаруживающееся в связи с присутствием в образце неоднородно распределенных дискретных частиц свободного самородного золота и вытекающими сложностями с отбором представительной навески из пробы и переводом золота в анализируемую форму. Здесь же можно обозначить трудности, возникающие на стадии пробоподготовки образцов для получения их порошкообразной формы. Отдельные частицы золота пластичны и ковки и могут «размазываться» на измельчительном оборудовании, что приводит к потерям аналита. Хотя данные сложности будут играть значение для всех методов, где в анализе используются относительно небольшие навески измельченных проб. Для повышения достоверности определения

свободного золота можно применять специальные подходы, в частности гравитационное обогащение [21].

В литературе есть сведения о заниженных на 14–26 % содержаниях золота в геологических образцах, установленных с помощью метода пробирной плавки, по сравнению с данными, полученными с помощью ИНАА [22]. ИНАА – это, по существу, неразрушающий и независимый от матричной основы метод. С его помощью определяются валовые содержания металлов, в отличие от кислотного разложения, которое представляет собой процесс выщелачивания и где может играть роль форма нахождения анализируемого компонента. Но и у метода ИНАА есть определенные ограничения, особенно в части, касающейся экспрессности анализа. Так, примерно неделя уходит на ядерный распад ряда активированных элементов, особенно натрия, прежде чем можно будет проводить измерение золота [23].

Говоря о применении «мокрой» химии для пробоподготовки образцов минерального сырья к определению золота, отметим, что уже долгое время как «царская водка», так и еще более агрессивная кислотная обработка с добавлением фтористоводородной и хлорной кислот используются в этом случае. Последний вариант часто называют «полным» или «четырёхкислотным» разложением. Характеризуя способ кислотного вскрытия проб для элементного анализа геологических материалов, стоит сказать, что ему присущи как хорошая способность переводить металлы в раствор, так и относительно низкая стоимость используемых реагентов.

Этот подход, однако, требует достаточно хорошей гомогенизации проб, так как предполагается использование относительно небольших (от нескольких сотен миллиграммов до единиц граммов) навесок. При анализе СОС, аттестованных на золото, и самих проб рекомендуется допускать максимальную величину частиц 200 меш, а лучше и меньшего размера, чтобы снизить степень инкапсуляции золота и «эффект самородка». Хотя ранее полученные результаты по определению золота при различных вариантах кислотной обработки и типах проб показали, что анализ золота в геологических материалах может быть более сложным и нестандартным, чем определение других металлов, и его следует рассматривать в каждом конкретном случае. Так, в одном из исследований использовалось всего 0,1–0,2 г образцов относительно низкой степени измельчения (~170 мкм или 90 меш) и была продемонстрирована высокая точность определения золота и серебра [24].

При измерении содержания золота в почвах и речных отложениях Б.К. Уорд и его коллеги [25] предположили, что «эффект самородка» может быть значительно уменьшен предварительным разделением почвы и глинистых материалов перед разложением «царской водкой». Другое исследование с использованием 0,5–1 г стандартных геологических образцов SARM-7 и SU-1a с микроволновым разложением при низком давлении в закрытых сосудах показало неудовлетворительные показатели степени извлечения аналита на

стадии пробоподготовки и сходимости результатов определения золота [26]. Экспериментально было продемонстрировано, что инкапсулирование золота в силикатах – это еще один источник вариаций при определении этого элемента в пробах горных пород, хотя, может быть, не такой распространенный, как считалось ранее. Так, в одном из исследований было обнаружено лишь небольшое расхождение результатов, полученных при анализе золота после разложения проб по методикам с «царской водкой» и полным разложением [27, 28].

Для решения методической задачи по определению содержания золота в ЖМО мы использовали метод атомной абсорбции с электротермической атомизацией. Данный метод, наряду с атомно-эмиссионной и атомно-флуоресцентной спектрометрией, относится к методам атомной спектроскопии. Иногда сюда также относят метод ИСП-МС [29]. Все эти методы, при определении с их помощью золота в геологических образцах, имеют как ряд преимуществ, так и некоторые недостатки, связанные в первую очередь со спектральными наложениями на аналитический сигнал золота от компонентов матричной основы пробы, в некоторых случаях недостаточной чувствительностью, точностью анализа [30]. В частности, применение метода ИСП-МС сопряжено с трудностями, вызванными моноизотопностью золота и наложением на его массу ^{197}Au сигналов ионов $^{180}\text{Hf}^{16}\text{O}^{16}\text{H}$ и $^{181}\text{Ta}^{16}\text{O}$, учитывая, что содержание Hf и Ta в геологических образцах может быть достаточно высоким [31]. Хотя метод ИСП-МС высокого разрешения позволяет уйти от этой проблемы [32], его использование в России может быть ограничено значительной стоимостью оборудования и сложностями его поставки. К тому же применение высокого разрешения в ИСП-МС значительно снижает чувствительность метода [31].

Применение метода ААС, как в варианте пламенной атомизации, так и с использованием графитовой кюветы для определения золота в горных породах, рудах и других геологических объектах, имеет многолетнюю историю [33], но практикуется и в настоящее время [34, 35]. В своем исследовании мы предварительно концентрировали золото экстрагированием с органическими сульфидами [36] и по методике соосаждения с теллуrom [37], так как предполагаемые низкие содержания золота в изучаемых объектах ЖМО, на фоне высоких содержаний матричных элементов, скорее всего не позволили бы проводить анализ напрямую, после кислотного разложения проб, даже с использованием достаточно чувствительного варианта ААС с электротермической атомизацией.

Методика извлечения золота из растворов с применением нефтяных сульфидов известна уже достаточно давно. Она была разработана в 70-е гг. прошлого века в Институте неорганической химии Сибирского отделения АН СССР под руководством А.В. Николаева [38]. Нефтяные сульфиды в то время получили промышленное применение как экстрагенты-комплексобразователи солей драгоценных и тяжелых металлов. Их комплексобразующие свойства связаны со способностью устанавливать донорно-

акцепторную связь с металлом передачей пары неподеленных электронов атома серы на вакантную электронную орбиталь металла.

Методика соосаждения с теллуrom была разработана для определения золота, платины, палладия и родия методом ИСП-МС в рудах и горных породах различного состава. Диапазон определяемых по ней содержаний составляет от 20 до 10000 нг/г. Нами было решено проверить ее применимость к определению золота в ЖМО с атомно-абсорбционным окончанием, наряду с методикой извлечения золота с использованием нефтесульфидов (дибутилсульфидом).

Материалы и методы

Определение золота было проведено в лаборатории микро- и наноисследований ЦКП «Приморский центр локального элементного и изотопного анализа» Дальневосточного геологического института ДВО РАН, г. Владивосток.

Исследовались образцы ЖМО (железомарганцевые корки) из различных районов северной части Тихого океана в количестве 5 штук (табл. 3), а также СОС железомарганцевых конкреций с аттестованным содержанием золота – ООПЕ 603 (СДО-6) и NOD-A-1. Пробы № 1 и 3 представляли собой поверхностный слой корок толщиной приблизительно 10–15 мм. Пробы № 2 и 4 являлись валовыми, а проба № 5 – это центральный слой толщиной порядка 20 мм. Для определения золота пробы сначала разлагали открытым способом с использованием смеси плавиковой и соляной кислот, растворяли осадок в царской водке с последующей обработкой раствором соляной кислоты и уже затем экстрагировали (концентрировали) золото из солянокислого раствора в виде комплексного соединения органическим сульфидом (дибутилсульфидом) в толуоле. Этот экстрагент характеризуется высокой избирательностью – вместе с золотом извлекается только палладий, который не мешает определению золота выбранным методом. Определение выполняли по каждой пробе из двух параллелей ввиду предполагаемой значительной дисперсии золота в образцах. Навеска пробы составляла 2,0 г.

Примененная схема кислотного разложения проб при определении золота с последующей экстракцией дибутилсульфидом была следующая:

1. Навески высушенного при $t=105^\circ\text{C}$ порошка проб массой 2 г помещали в стеклоглеродные тигли.
2. Добавляли 15 см^3 HF конц. и 5 см^3 HCl конц. и оставляли на 10 часов.
3. Нагревали на электропечи тигли с раствором до появления паров HF и выпаривали «досуха».
4. Добавляли к сухому остатку 20 см^3 «царской водки» (на 3 части HCl конц. + 1 часть HNO_3 конц.).
5. Выдерживали 20 минут, и выпаривали раствор, снова добавляли 5 см^3 «царской водки», выпаривали до влажных солей.
6. Добавляли 10 см^3 HCl конц. и выпаривали до влажных солей.
7. Добавляли 5 см^3 HCl конц. и выпаривали до влажных солей.

8. Добавляли 30 см³ раствора 1М HCl, доводили до кипения и фильтровали в стеклянные колбы, промывали горячим раствором 1М HCl.
9. Добавляли в колбы по 2 см³ дибутилсульфида в толуоле и экстрагировали в течение 5 мин.
10. Измеряли в экстрактах концентрацию Au на ААС спектрофотометре.

Для выработки оптимальной схемы подготовки проб ЖМО к определению в них золота также использовалась схема с предварительным выделением золота его соосаждением с теллуром. Методика была частично модифицирована нами, когда осадок после соосаждения растворяли в смеси HCl конц. и H₂O₂ конц. в соотношении 1:1, и выглядела следующим образом:

1. Навески порошка проб массой 2 г в фарфоровых лодочках помещали на 3 часа в муфельную печь при t=600 °C для их минерализации.
2. Продукт минерализации переносился в стеклоуглеродные тигли.
3. Добавляли 20 см³ HF конц. в тигли и оставляли на 10 часов.
4. Нагревали на электропечи тигли с раствором до начала выделения паров HF и выпаривали «досуха».
5. Добавляли к сухому остатку 20 см³ «царской водки» (на 3 части HCl конц. + 1 часть HNO₃ конц.).
6. Выдерживали 20 минут, и выпаривали раствор, снова добавляли 5 см³ «царской водки», выпаривали до влажных солей.
7. Добавляли 10 см³ HCl конц. и выпаривали до влажных солей.
8. Добавляли 5 см³ HCl конц. и выпаривали до влажных солей.
9. Добавляли 30 см³ раствора 1М HCl, кипятили полученные растворы и фильтровали в стеклянные стаканы, промывали горячим раствором 1М HCl.
10. Добавляли 3 см³ раствора Те (металлического в азотной кислоте, концентрация 2 мг/см³).
11. Нагревали растворы на электропечи.
12. Добавляли 2 см³ 10 % раствора SnCl₂ до появления устойчивой темной окраски осадка теллура, приливали еще 10 см³ избытка раствора SnCl₂, выполняли кипячение до осветления раствора.
13. Растворы фильтровали, обмывали стаканы горячей 2М HCl, фильтрат удаляли.
14. Осадок растворяли в 10 см³ смеси HCl конц. и H₂O₂ конц. в соотношении 1:1.
15. Растворы фильтровали, фильтрат промывали теплой 1М HCl и упаривали до 10 см³.
16. Измеряли в полученных растворах концентрацию Au на ААС спектрофотометре.

Определение золота в пробе выполняли из двух параллелей.

Содержание Au по обеим схемам пробоподготовки измерялось атомно-абсорбционным методом в режиме электротермической атомизации на спектрофотометре AA-6800 (Shimadzu, Япония). Предел определения золота 0,2 нг/г для методики экстракцией дибутилсульфидом.

Результаты исследования и их обсуждение

При определении золота атомно-абсорбционным методом как в пламенном варианте, так и при электротермической атомизации в графитовой кювете возникает ряд трудностей, обусловленных в первую очередь спектральными наложениями на аналитическую линию золота 242,8 нм [39]. В частности, такое наложение может давать железо, имеющее полосу поглощения в области 248,3 нм, содержание которого в ЖМО обычно составляет единицы и десятки % мас. Даже с учетом наличия инструментальных способов устранения неселективного поглощения от матричной основы пробы, таких как расщепление спектральных линий в магнитном поле (эффект Зеемана), полностью избавиться от спектральных помех не представляется возможным.

По результатам эксперимента по выбору оптимальной схемы пробоподготовки для последующего измерения концентрации золота мы остановились на методике экстракции золота дибутилсульфидом в толуоле, так как методика соосаждения с теллуром привела к совместному извлечению с золотом железа в концентрациях, оказывающих мешающее влияние на точность определения золота. Отличительной же особенностью методики HСAM 237-С является ее высокая селективность, позволяющая избавиться от влияния матричных компонентов. Дибутилсульфид совместно с золотом извлекает из раствора только палладий, и то при его содержании более 10 мг/дм³, что нехарактерно для проб в случае ЖМО. В целом нефтесульфиды являются достаточно доступными и недорогими экстрагентами. Скорость и избирательность процесса экстракции металлов нефтяными сульфидами можно варьировать при помощи состава водно-кислотной среды типа органического растворителя и корректировкой температуры раствора. К недостатку используемой методики можно отнести возможность окисления сульфидов до сульфоксидов при контакте с водными растворами.

Одной из сложностей, связанных с анализом проб с высоким содержанием железа, является сорбция золота на соединениях этого элемента с последующим занижением результатов определения. В этой связи нами была проверена полнота извлечения золота в органическую фазу из проб ЖМО с различным содержанием железа. Также данный эксперимент позволил оценить устранение спектрального наложения сигнала железа на сигнал золота за счет отсутствия совместной экстракции этих элементов по методике HСAM 237-С.

С этой целью был использован сертифицированный раствор, содержащий золото (High-purity standards, USA), который вводили в исследуемые пробы перед экстракцией золота. Последующий анализ показал как отсутствие значимых потерь золота в ходе пробоподготовки, так и отсутствие завышения результатов определения (табл. 1). Данные в столбце «Найдено» приведены уже после вычета исходно содержащегося в пробах золота.

Таблица 1. Оценка полноты извлечения золота методом «введено–найдено» ($n=5$; $P=0,95$)

Table 1. Evaluation of the completeness of gold recovery using the «added–found» method ($n=5$; $P=0,95$)

Шифр пробы Sample code	Содержание Fe в пробе, % Fe content, %	Введено Added	Найдено Found	RSD, %
		Au, мг/дм ³ /mg/dm ³		
Med1945/6	0,18	0,040	0,039	2,5
Det 13	18,8	0,040	0,036	10,0

Относительное стандартное отклонение (relative standard deviation – RSD) составило 10 % при содержании железа в пробе 18,8 %, что является приемлемым результатом при таких концентрациях золота.

По предлагаемой методике с использованием экстракции органическими сульфидами было выполнено определение валового содержания золота и дана методическая оценка результатов анализа для СОС конкреций железомарганцевых ГСО 5375-90 (ООПЕ 603) и NOD-A-1 Геологической службы США (табл. 2) и проб ЖМО (табл. 3).

Таблица 2. Результаты определения золота в СОС конкреций железомарганцевых ООПЕ 603 и NOD-A-1, нг/г

Table 2. Results of gold determination in the CRM of the ferromanganese nodules OОPE 603 and NOD-A-1, ng/g

СОС/CRM	Аттестовано Certified	Найдено Found X ($n=5$)	RSD, %
ООПЕ 603	10±6	12±5	23,01
NOD-A-1	<9	13-240	–

Полученное нами значение $RSD=23,01$ % при анализе стандарта СДО-6 коррелирует с данными [6] по определению золота в СОС железомарганцевых корок GSMC-1, -2, CDO-4, -5 по методике предварительного концентрирования с порошкообразным сорбентом ПОЛИОРГС-IV и так же, как и в нашем случае, последующим электротермическим ААС анализом. Величины RSD в упомянутой работе составили от 20,8 до 69,4 %, что может говорить о достаточно неоднородном содержании золота в изученных СОС, так как инструментальное RSD не превышало 4,0 %. Авторами отмечается общий недостаток литературных данных по анализу СОС ЖМО, в частности для образца железомарганцевой конкреции FeMn-1, и методические особенности при определении золота и других благородных металлов в подобных образцах в связи с очень низким соотношением содержаний анализов и компонентов матричной основы проб.

Плохая представительность проб ЖМО при количественном определении в них золота может быть объяснена природными особенностями их состава, такими как присутствие в образцах самородного золота, вызывающего ранее описанный эффект, осложняющий процесс подготовки проб к анализу. В качестве примера можно привести первое обнаружение нами [40] частиц природных сплавов золота в железомарганцевых корках северо-западной части Тихого океана (рисунок) с использованием метода аналитической сканирующей электронной микроскопии (СЭМ-ЭДС).

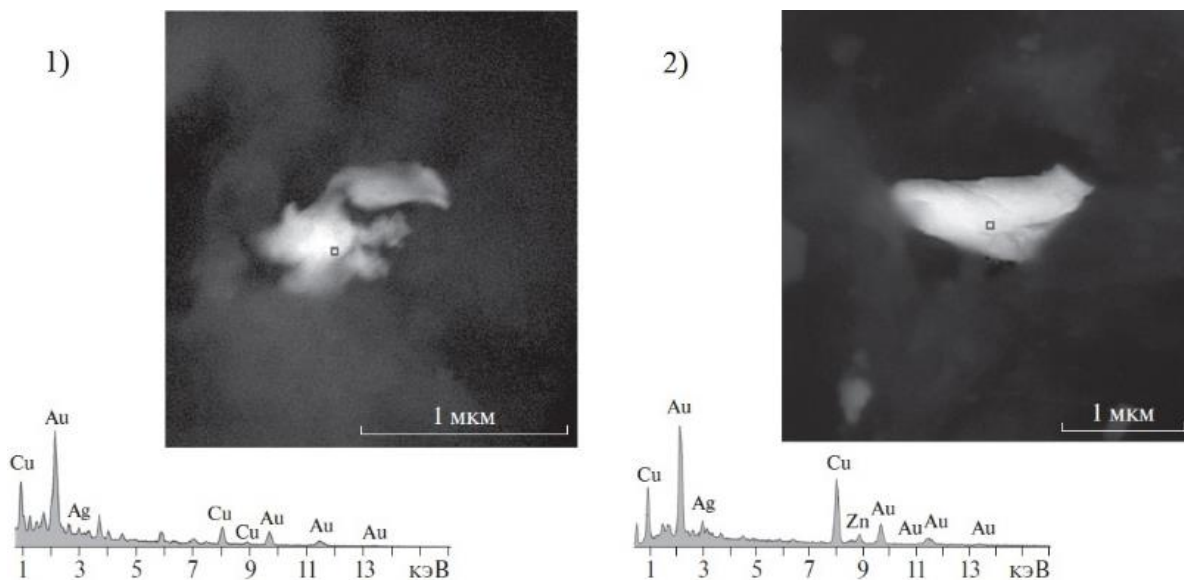


Рисунок. СЭМ-изображения и ЭДС-спектры состава (мас. %) микрозерен природных Ag–Au–Cu-сплавов из рудных Fe-Mn корок: 1) зерно (Ag – 8,44; Au – 64,19; Cu – 27,36) из корки с гайота Ильичева Магеллановых гор; 2) зерно (Ag – 7,19; Au – 31,39; Cu – 56,66) из корки с гайота Вулканолог Магеллановых гор

Figure. SEM images and EDS spectra (wt. %) of natural Ag–Au–Cu alloy micrograins from Fe–Mn ore crusts: 1) grain (Ag – 8,44; Au – 64,19; Cu – 27,36) from Ilyichev guyot of Magellanic mountains crust; 2) grain (Ag – 7,19; Au – 31,39; Cu – 56,66) from Vulcanolog guyot of Magellanic mountains crust

Достаточно большое количество литературных данных приводится по анализу на благородные металлы, в том числе и золото, СОС железомарганцевой конкреции NOD-A-1 [1]. Для этих данных отмечается

сильный разброс, увязываемый с очень низким содержанием определяемых элементов, их дисперсностью, а также различием в методиках пробоподготовки и применяемых инструментальных методах. В ис-

следовании Е.Д. Бережной и А.В. Дубинина [1] полученные значения по содержанию золота в стандартном образце NOD-A-1 также имеют невысокую сходимость: для шести замеров было установлено значение ниже предела определения 0,2 нг/г, а для двух других – 8 и 11 нг/г на сухое вещество. Для решения этой проблемы авторами предлагается увеличение массы анализируемой навески, которая в их эксперименте составляла 0,4–0,8 г высушенной пробы.

В своей работе нами также был проанализирован на содержание золота стандартный образец NOD-A-1 (табл. 2). Были взяты 4 навески по 2 г сухого образца. Полученные в широком диапазоне значения 22, 240, 130 и 13 нг/г превысили допустимое расхождение, и результат анализа нельзя было признать удовлетворительным. Стоит отметить, что на известном интернет-ресурсе GeoReM [41] содержание золота в стандарте NOD-A-1 дается как сомнительное (uncertain) – <9 нг/г. По всей видимости, для достижения удовлетворительной точности определения золота в указанном СОС необходимо еще больше увеличивать массу анализируемой навески. Исследования в данном направлении будут нами продолжены.

Исследованные нами пробы ЖМО содержали золото в достаточно широком диапазоне – от 0,2 до 18 нг/г (табл. 3). Полученные значения после статистической обработки в соответствии с [42] были признаны удовлетворительными и отвечающими нормам погрешности при определении химического состава минерального сырья. Рассчитанные значения среднеквадратичных отклонений результатов анализа (относительной погрешности) не превышали 30 %.

Таблица 3. Результаты определения золота в пробах ЖМО, нг/г

Table 3. Results of gold determination in samples of ferromanganese formations, ng/g

Шифр пробы Sample code	Геоструктура Geostructure	Район отбора Sampling area	(X±Δ)*
Kost 80/1	Трог Кашеварова Kashevarov Trog	Охотское море Sea of Okhotsk	18±6
Med1945/6	Вулкан Медведева Medvedev Volcano	Японское море Sea of Japan	17±5
Zub 17/1	Гайот Зубова Zubov Guyot	Маршалловы острова, С-З Пацифика Marshall islands, N-W Pacific	2,1±0,6
Ber 124	Массив Вулканологов Vulkanologov Massif	Берингово море Sea of Bering	2,2±0,7
Det 13	Гайот Детройт Detroit Guyot	Императорский хребет, С Пацифика ImperorRidge, N Pacific	0,20±0,06

*Примечание: X – результат анализа, нг/г; Δ – характеристика погрешности измерения.

*Note: X is the result of analysis, ng/g; Δ is the measurement precision characteristic.

При этом в образце Det 13 с гайота Детройт был ранее определен [7] широкий набор химических элементов, в том числе платиноидов и золота, методом ИСП-МС по методике сорбционного концентрирования на анионите Dowex-1×8. Причем анализ проводился послойно, всего было проанализировано 7 слоев изучаемого образца. Содержание золота в различных горизонтах составило от 0,2 до 1,0 нг/г, с содержанием в центральной части 0,3 нг/г. Нами было получено сопоставимое значение содержания золота в этом образце (для его центрального слоя) по методике экстракции золота дибутилсульфидом в толуоле – 0,20±0,06 нг/г.

Заключение

В работе была изучена применимость методик соосаждения золота с теллуром и экстракции с использованием нефтесульфидов (дибутилсульфида) для определения золота в ЖМО с атомно-абсорбционным окончанием с электротермической атомизацией.

Методика экстракции золота с дибутилсульфидом в толуоле показала свое преимущество для целей анализа ЖМО, по сравнению с процедурой соосаждения с теллуром, в связи с ее высокой селективностью, позволяющей избавляться от влияния матричных компонентов, в первую очередь железа, формирующего мешающее наложение спектральных линий при ААС определении золота.

Методика экстракции золота с дибутилсульфидом была апробирована для анализа образцов ЖМО из различных районов северной части Тихого океана, а также стандартных образцов состава ЖМО – российском СОС ООПЕ 603 (СДО-6) и американском стандарте NOD-A-1. Использование воздушносухой навески 2 г образца дало удовлетворительный результат при анализе стандартного образца СДО-6 с аттестованным содержанием золота 10±6 нг/г, но не позволило успешно проанализировать образец NOD-A-1, для которого были получены невоспроизводимые результаты. В этой связи для определения в данном стандарте золота рекомендуется использование еще больших навесок.

ААС определение золота в изученных образцах ЖМО по предлагаемой методике показало результаты, отвечающие требованиям геохимического анализа, в том числе и по сравнению с ИСП-МС методом. Однако проведенное нами ранее электронно-микроскопическое исследование железомарганцевых корок северо-западной части Тихого океана выявило присутствие в них золотых микрозерен, что может в свою очередь вызывать методические сложности в процессе отбора представительной пробы и процедуре подготовки рассмотренных типов минеральных образований к анализу.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 18-17-00015, <https://rscf.ru/project/18-17-00015/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бережная Е.Д., Дубинин А.В. Элементы платиновой группы и золото в стандартном образце железомарганцевой конкреции NOD-A-1 // *Геохимия*. – 2017. – № 2. – С. 186–193. URL: <https://doi.org/10.7868/S0016752517010034> (дата обращения 13.10.2022).
2. Harris R.C., Crockett J.H., Stainton M. Palladium, iridium and gold in deep sea manganese nodules // *Geochimica Cosmochimica Acta*. – 1968. – V. 32. – № 10. – P. 1049–1056. URL: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(68\)90107-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(68)90107-5) (дата обращения 13.10.2022).
3. Glasby G.P., Keays R.R., Rankin P.C. The distribution of rare earth, precious metals and other trace elements in recent and fossil deep-sea manganese nodules // *Geochemical Journal*. – 1978. – V. 12. – № 4. – P. 229–243. URL: <https://doi.org/10.2343/geochemj.12.229> (дата обращения 13.10.2022).
4. Платина и золото в железомарганцевых корках Тихого океана / Г.Н. Багурин, Е.В. Коноплева, В.Т. Дубинчук, М.Е. Мельников // *Океанология*. – 2005. – Т. 45. – № 2. – С. 286–294.
5. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: comparison with land-based resources / J.R. Hein, K. Mizell, A. Koschinsky, T.A. Conrad // *Ore Geology Review*. – 2013. – V. 51. – P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.12.001> (дата обращения 13.10.2022).
6. Кубракова И.В., Набиуллина С.Н., Тютюник О.А. Определение ЭПГ и золота в геохимических объектах: опыт использования спектрометрических методов // *Геохимия*. – 2020. – Т. 65. – № 4. – С. 328–342. URL: <https://doi.org/10.31857/S0016752520040056> (дата обращения 21.10.2022).
7. Геохимия элементов группы платины в железомарганцевой корке гайота Дрейт, Тихий океан / Е.Д. Бережная, А.В. Дубинин, Е.Н. Зологина, Е.В. Михайлик // *Океанология*. – 2021. – Т. 61. – № 1. – С. 106–115. URL: <https://doi.org/10.31857/S0030157421010032> (дата обращения 25.10.2022).
8. Mikhailik P., Mikhailik E., Ivanov V. Gold in ferromanganese deposits from the NW Pacific // *Minerals*. – 2021. – V. 11. – № 9. URL: <https://doi.org/10.3390/min11090979> (дата обращения 13.10.2022).
9. Liu Y.H., Wan B., Xue D.S. Sample digestion and combined preconcentration methods for the determination of ultra-low gold levels in rocks // *Molecules*. – 2019. – V. 24. – № 9. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules24091778> (дата обращения 13.10.2022).
10. Solid phase extraction of gold (III) on amberlite XAD-2000 prior to its flame atomic absorption spectrometric determination / L. Elci, D. Sahan, A. Basaran, M. Soylak // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2007. – V. 132. – P. 331–338. URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9537-6> (дата обращения 13.10.2022).
11. Soylak M., Elci L., Dogan M. A sorbent extraction procedure for the preconcentration of gold, silver and palladium on an activated carbon column // *Analytical Letters*. – 2000. – V. 33. – № 3. – P. 513–525. URL: <https://doi.org/10.1080/00032710008543070> (дата обращения 13.10.2022).
12. Selective adsorption and recovery of precious metal ions using protein-rich biomass as efficient adsorbents / T. Maruyama, Y. Terashima, S. Takeda, F. Okazaki, M. Goto // *Process Biochemistry*. – 2014. – V. 49. – P. 850–857. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.02.016> (дата обращения 13.10.2022).
13. Fouad H.K., Elrakiby R.M., Hashim M.D. The application of flame atomic absorption spectrometry for gold determination in some of its bearing rocks // *American Journal of Analytical Chemistry*. – 2015. – V. 6. – № 5. – P. 411–421. URL: <https://doi.org/10.4236/ajac.2015.65040> (дата обращения 13.10.2022).
14. Sacmaci S., Kartal S., Kalkan G. Determination of gold in various environment samples by flame atomic absorption spectrometry using dispersive liquid-liquid microextraction sampling // *Croatica Chemica Acta*. – 2015. – V. 88. – № 2. – P. 113–119. URL: <http://dx.doi.org/10.5562/cca2412> (дата обращения 13.10.2022).
15. Eco-friendly and rapid extraction of gold by in-situ catalytic oxidation with N-bromosuccinimide / X. Liu, Y. Wang, L. Xiao, L. Ma, P. Han, S. Ye // *Heliyon*. – 2022. – V. 8. – № 6. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09706> (дата обращения 13.10.2022).
16. Singh N. A rugged, precise and accurate new gravimetry method for the determination of gold: an alternative to fire assay method // *Springer Plus*. – 2012. – V. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/2193-1801-1-14> (дата обращения 13.10.2022).
17. Wang Y., Baker L.A., Brindle I.D. Determination of gold and silver in geological samples by focused infrared digestion: Are-investigation of aqua regia digestion // *Talanta*. – 2016. – V. 148. – P. 419–426. URL: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.11.019> (дата обращения 13.10.2022).
18. Battaini P., Vemporad E., De Felicitis D. The fire assay reloaded // *Gold Bulletin*. – 2014. – V. 47. – P. 9–20. URL: <https://doi.org/10.1007/s13404-013-0101-1> (дата обращения 13.10.2022).
19. Современные методики анализа горных пород, руд и технологических продуктов при лабораторно-аналитическом сопровождении ГРП на благородные и цветные металлы / А.В. Мандругин, Г.В. Седелникова, А.П. Кузнецов, Т.В. Пучкова, Б.Л. Серебряный, Л.Г. Симакова, В.И. Гума // *Руды и металлы*. – 2015. – № 1. – С. 64–73.
20. Determination of gold in geological samples combining the fire assay and ultraviolet visible spectrophotometry techniques / R.R. Yasat, O.M. Rivera-Borroto, J.M.G. Vega, J.B. Torre, I. Valentin-Rodriguez, L.P. Rivero // *Academia Journal of Scientific Research*. – 2018. – V. 6. – № 1. – P. 27–33. URL: <https://doi.org/10.15413/ajsr.2017.0112> (дата обращения 13.10.2022).
21. Богомолов В.А. Разработка методики предварительного гравитационного обогащения руд со свободным золотом с целью повышения достоверности его определения // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2013. – № 1. – С. 338–344.
22. Bias in the analysis of geological materials for gold using current methods / G.E.M. Hall, J.E. Vaive, J.A. Coope, E.F. Weiland // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1989. – V. 34. – № 2. – P. 157–171. URL: [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(89\)90098-8](https://doi.org/10.1016/0375-6742(89)90098-8) (дата обращения 13.10.2022).
23. Hoffman E.L., Clark J.R., Yeager J.R. Gold analysis – fire assaying and alternative methods // *Exploration and Mining Geology*. – 1998. – V. 7. – № 1–2. – P. 155–160.
24. Alvarado J., Petrola A. Determination of cadmium, chromium, lead, silver and gold in Venezuelan red mud by atomic absorption spectrometry // *Journal of Analytical Spectrometry*. – 1989. – V. 4. – № 5. – P. 411–414. URL: <https://doi.org/10.1039/JA9890400411> (дата обращения 13.10.2022).
25. Ward B.C., Leybourne M.I., Sacco D.N. Drift prospecting within the QUEST project area, Central British Columbia (NTS093J): potential for porphyry copper-gold, volcanic massive sulfide mineralization and gold-copper veins // *Geoscience BC Summary of Activities 2010*. – Geoscience BC, 2011. – Report 2011–1. – P. 73–96.
26. Totland M.M., Jarvis I., Jarvis K.E. Microwave digestion and alkalifusion procedures for the determination of the platinum-group elements and gold in geological materials by ICP-MS // *Chemical Geology*. – 1995. – V. 124. – № 1–2. – P. 21–36. URL: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00021-D](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00021-D) (дата обращения 13.10.2022).
27. Chow A., Beamish F.E. An experimental evaluation of neutron activation, wet assay and fire assay methods of determining gold in ores // *Talanta*. – 1967. – V. 14. – № 2. – P. 219–231. URL: [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(67\)80181-4](https://doi.org/10.1016/0039-9140(67)80181-4) (дата обращения 13.10.2022).
28. Balaram V., Anjiah K.V. Direct estimation of gold in geological samples by inductively coupled plasma mass spectrometry // *Journal of Indian Chemical Society*. – 1997. – V. 74. – P. 581–583.
29. Пупышев А.А. Атомная спектроскопия и атомный спектральный анализ. Библиографический указатель русскоязычных книг по теории, аппаратуре и практике применения методов // *Аналитика и контроль*. – 2016. – Т. 20. – № 1. – С. 67–102. URL: <https://doi.org/10.15826/analitika.2016.20.1.005> (дата обращения 13.10.2022).
30. Pyrzyńska K. Recent developments in the determination of gold by atomic spectrometry techniques // *Spectrochimica Acta, Part B*. – 2005. – V. 60. – P. 1316–1322. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2005.06.010> (дата обращения 13.10.2022).
31. Гребнева-Балюк О.Н., Кубракова И.В. Определение элементов платиновой группы в геологических объектах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой: возможно-

- сти и ограничения // Журнал аналитической химии. – 2020. – Т. 75. – № 3. – С. 195–208. URL: <https://doi.org/10.31857/S0044450220030068> (дата обращения 21.10.2022).
32. Multielemental analysis of Mn-Fe nodules by ICP-MS: optimisation of analytical method / M.D. Axelsson, I. Rodushkin, J. Ingrid, B. Öhlander // Analyst. – 2002. – V. 127. – № 1. – P. 76–82. URL: <https://doi.org/10.1039/b105706r> (дата обращения 13.10.2022).
33. Экстракционно-атомно-абсорбционный метод одновременного определения золота и серебра в геохимических объектах / Л.А. Терентьева, Л.Д. Афанасьева, Г.К. Чалкова, Н.Г. Ванифатова, В.Г. Торгов, Ю.А. Золотов // Заводская лаборатория. – 1983. – Т. 49. – № 8. – С. 25–29.
34. Формы нахождения золота и серебра в рудах Ново-Урского месторождения (Салаирский край) / И.Н. Мякая, Б.Ю. Сарыгоол, Е.В. Лазарева, Н.В. Ишук, С.М. Жмодик // Металлогения древних и современных океанов. – 2017. – № 1. – С. 171–176.
35. Формы нахождения золота в рудах и минералах Наталкинско-го месторождения (Северо-Восток России) / Р.Г. Кравцова, А.С. Макшаков, В.Л. Таусон, О.Ю. Белозерова, В.В. Татарinov // Геодинамика и тектонофизика. – 2022. – Т. 13. – № S2. URL: <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0595> (дата обращения 13.10.2022).
36. Определение золота в горных породах, рудах и продуктах их переработки экстракционно-атомно-абсорбционным методом с органическими сульфидами (методика НСАМ 237-С). – М.: ВИМС, 2016. – 18 с.
37. Чурсанов Ю.В., Старовойтов А.В. Атомно-абсорбционное определение золота в анализаторе с электро термической атомизацией и предварительным выделением соосаждением с теллуrom // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. – 2013. – № 15. – С. 18–24.
38. Золотов Ю.А. Очерки аналитической химии. – М.: Химия, 1977. – 240 с.
39. Юделевиц И.Г., Старцева Е.А. Атомно-абсорбционное определение благородных металлов. – Новосибирск: Наука, 1981. – 159 с.
40. Иванов В.В., Ханчук А.И., Михайлик П.Е. Природа самородного золота в железомарганцевых корках северо-западной части Тихого океана // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 497. – № 1. – С. 44–48. URL: <https://doi.org/10.31857/S2686739721030038> (дата обращения 27.10.2022).
41. База данных по геохимическим, экологическим и биологическим эталонным материалам. URL: <http://geogem.mprch-mainz.gwdg.de/> (дата обращения 27.10.2022).
42. ОСТ 41-08-212-04. Управление качеством аналитических работ. Нормы погрешности при определении химического состава минерального сырья и классификация методик лабораторного анализа по точности результатов. – М.: ФГУП ВИМС, 2004. – 23 с.

Поступила 31.10.2022 г.
Прошла рецензирование 09.11.2022 г.

Информация об авторах

Блохин М.Г., кандидат биологических наук, заместитель директора по научной работе Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

Зарубина Н.В., научный сотрудник лаборатории аналитической химии Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

Иванов В.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории микро- и наноисследований Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

Михайлик П.Е., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории региональной геологии и тектоники Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

UDC 543.421

EXTRACTION-ATOMIC-ABSORPTION DETERMINATION OF GOLD IN MARINE FERROMANGANESE FORMATIONS AFTER ITS CONCENTRATION WITH DIBUTYL SULPHIDE IN TOLUENE

Maksim G. Blokhin¹,
blokhin@fegi.ru

Natalya V. Zarubina¹,
zarubina@fegi.ru

Vladimir V. Ivanov¹,
d159327@yandex.ru

Pavel E. Mikhailik¹,
mikhailik@fegi.ru

¹ Far East Geological Institute FEB RAS,
159, Prospekt 100-letiya Vladivostoka, Vladivostok, 690022, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to develop methodological solutions for the quantitative determination of gold content in ferromanganese formations and other geological objects due to the chemical and analytical difficulties that exist here and the insufficient number of certified reference materials of ferromanganese formations with a reliably certified gold content in them.

The main aim is verification of the applicability of the gold extraction technique using petroleum sulfides (dibutyl sulfide in toluene) for determining gold in ferromanganese formations with electrothermal atomic absorption termination, along with the gold extraction method by its co-precipitation with tellurium.

Objects: samples of ferromanganese formations from various regions of the North Pacific Ocean, as well as the Russian certified reference materials with a certified gold content OOPE 603 (SDO-6) and the USGS standard NOD-A-1.

Methods. Gold was concentrated during its determination in ferromanganese formations by the methods of extraction with dibutyl sulfide in toluene and co-precipitation with tellurium and electrothermal atomic absorption analysis. Processing of the obtained results was carried out using the methods of mathematical statistics.

Results. The method of gold extraction with dibutyl sulfide in toluene has shown its advantage for the purposes of analysis of ferromanganese formations in comparison with the procedure of co-precipitation with tellurium, due to its high selectivity, which makes it possible to get rid of the influence of matrix components, primarily iron, which forms an interfering superposition of spectral lines during atomic absorption determination of gold. The technique of gold extraction with dibutyl sulfide was tested for the analysis of ferromanganese formations samples from various regions of the North Pacific Ocean, as well as for the analysis of ferromanganese formations samples – the Russian OOPE 603 (SDO-6) and the American standard NOD-A-1. The use of an air-dry sample of 2 g of the sample gave a satisfactory result in the analysis of the standard sample SDO-6, with a certified gold content of 10 ± 6 ng/g, but did not allow successful analysis of the NOD-A-1 sample, for which irreproducible results were obtained. In this regard, the use of even larger weights is recommended for defining gold in this standard. Atomic absorption determination of gold in the studied ferromanganese formations samples using the proposed method gave results that meet the requirements of geochemical analysis, including in comparison with the ICP-MS method. However, an earlier electron microscopic study of ferromanganese crusts in the northwestern part of the Pacific Ocean showed the presence of native gold particles in them, which, in its turn, can cause methodological difficulties in the process of taking a representative sample and the procedure for preparing ferromanganese formations samples for analysis.

Key words:

Atomic absorption analysis, gold, extraction, dibutyl sulfide, «nugget effect», ferromanganese formations, certified reference materials.

The research was carried out under the support of the grant of the Russian Science Foundation (Project no. 18-17-00015), <https://rscf.ru/en/project/18-17-00015/>

REFERENCES

- Berezhnaya E.D., Dubinin A.V. Determination of the platinum-group elements and gold in ferromanganese nodule reference material NOD-A-1. *Geochemistry International*, 2017, vol. 55, no. 2, pp. 218–224. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0016702917010037> (accessed 13 October 2022).
- Harris R.C., Crockett J.H., Stainton M. Palladium, iridium and gold in deep sea manganese nodules. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1968, vol. 32, no. 10, pp. 1049–1056. Available at: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(68\)90107-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(68)90107-5) (accessed 13 October 2022).
- Glasby G.P., Keays R.R., Rankin P.C. The distribution of rare earth, precious metals and other trace elements in recent and fossil deep-sea manganese nodules. *Geochemical Journal*, 1978, vol. 12, no. 4, pp. 229–243. Available at: <https://doi.org/10.2343/geochemj.12.229> (accessed 13 October 2022).
- Baturin G.N., Konopleva E.V., Dubinchuk V.T., Melnikov M.E. Platinum and gold in the ferromanganese crusts of the Pacific ocean. *Oceanology*, 2005, vol. 45, no. 2, pp. 269–276.
- Hein J.R., Mizell K., Koschinsky A., Conrad T.A. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: comparison with land-based resources. *Ore Geology Review*, 2013, vol. 51, pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.12.001> (accessed 13 October 2022).
- Kubrakova I.V., Nabiullina S.N., Tyutyunnik O.A. Au and PGE determination in geochemical materials: experience in applying spectrometric techniques. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no. 4, pp. 377–390. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0016702920040059> (accessed 21 October 2022).
- Berezhnaya E.D., Dubinin A.V., Zologina E.N., Mikhailik E.V. Platinum group element geochemistry in ferromanganese crust of

- the Detroit guyot, Pacific Ocean. *Oceanology*, 2021, vol. 61, no. 1, pp. 94–103. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0001437021010033> (accessed 25 October 2022).
8. Mikhailik P., Mikhailik E., Ivanov V. Gold in ferromanganese deposits from the NW Pacific. *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 9. Available at: <https://doi.org/10.3390/min11090979> (accessed 13 October 2022).
 9. Liu Y.H., Wan B., Xue D.S. Sample digestion and combined pre-concentration methods for the determination of ultra-low gold levels in rocks. *Molecules*, 2019, vol. 24, no. 9. Available at: <https://doi.org/10.3390/molecules24091778> (accessed 13 October 2022).
 10. Elci L., Sahar D., Basaran A., Soylak M. Solid phase extraction of gold (III) on amberlite XAD-2000 prior to its flame atomic absorption spectrometric determination. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, vol. 132, pp. 331–338. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9537-6> (accessed 13 October 2022).
 11. Soylak M., Elci L., Dogan M. A sorbent extraction procedure for the preconcentration of gold, silver and palladium on an activated carbon column. *Analytical Letters*, 2000, vol. 33, no. 3, pp. 513–525. Available at: <https://doi.org/10.1080/00032710008543070> (accessed 13 October 2022).
 12. Maruyama T., Terashima Y., Takeda S., Okazaki F., Goto M. Selective adsorption and recovery of precious metal ions using protein-rich biomass as efficient adsorbents. *Process Biochemistry*, 2014, vol. 49, pp. 850–857. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.02.016> (accessed 13 October 2022).
 13. Fouad H.K., Elrakaby R.M., Hashim M.D. The application of flame atomic absorption spectrometry for gold determination in some of its bearing rocks. *American Journal of Analytical Chemistry*, 2015, vol. 6, no. 5, pp. 411–421. Available at: <https://doi.org/10.4236/ajac.2015.65040> (accessed 13 October 2022).
 14. Sacmaci S., Kartal S., Kalkan G. Determination of gold in various environment samples by flame atomic absorption spectrometry using dispersive liquid–liquid microextraction sampling. *Croatia Chemica Acta*, 2015, vol. 88, no. 2, pp. 113–119. Available at: <http://dx.doi.org/10.5562/cca2412> (accessed 13 October 2022).
 15. Liu X., Wang Y., Xiao L., Ma L., Han P., Ye S. Eco-friendly and rapid extraction of gold by in-situ catalytic oxidation with N-bromosuccinimide. *Heliyon*, 2022, vol. 8, no. 6. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09706> (accessed 13 October 2022).
 16. Singh N. A rugged, precise and accurate new gravimetry method for the determination of gold: an alternative to fire assay method. *Springer Plus*, 2012, vol. 1. Available at: <https://doi.org/10.1186/2193-1801-1-14> (accessed 13 October 2022).
 17. Wang Y., Baker L.A., Brindle I.D. Determination of gold and silver in geological samples by focused infrared digestion: Re-investigation of aqua regia digestion. *Talanta*, 2016, vol. 148, pp. 419–426. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.11.019> (accessed 13 October 2022).
 18. Battaini P., Bemporad E., De Felicis D. The fire assay reloaded. *Gold Bulletin*, 2014, vol. 47, pp. 9–20. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13404-013-0101-1> (accessed 13 October 2022).
 19. Mandrugina A.V., Sedelnikova G.V., Kuznetsov A.P., Puchkova T.V., Serebryany B.L., Simakova L.G., Guma V.I. Modern techniques and methods of the geological materials analysis for precious and base metals. *Rudy i metally*, 2015, no. 1, pp. 64–73. In Rus.
 20. Yaset R.R., Rivera-Borroto O.M., Vega J.M.G., Torre J.B., Valentin-Rodriguez I., Rivero L.P. Determination of gold in geological samples combining the fire assay and ultraviolet visible spectrophotometry techniques. *Academia Journal of Scientific Research*, 2018, vol. 6, no. 1, pp. 27–33. Available at: <https://doi.org/10.15413/ajsr.2017.0112> (accessed 13 October 2022).
 21. Bogomolov V.A. Razrabotka metodiki predvaritel'nogo gravitatsionnogo obogashcheniya rud so svobodnym zolotom s tselyu povysheniya dostovernosti ego opredeleniya [Development of a technique for preliminary gravitational enrichment of ores with free gold in order to increase the reliability of its determination]. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*, 2013, no. 1, pp. 338–344.
 22. Hall G.E.M., Vaive J.E., Coope J.A., Weiland E.F. Bias in the analysis of geological materials for gold using current methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 1989, vol. 34, no. 2, pp. 157–171. Available at: [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(89\)90098-8](https://doi.org/10.1016/0375-6742(89)90098-8) (accessed 13 October 2022).
 23. Hoffman E.L., Clark J.R., Yeager J.R. Gold analysis – fire assaying and alternative methods. *Exploration and Mining Geology*, 1998, vol. 7, no. 1–2, pp. 155–160.
 24. Alvarado J., Petrola A. Determination of cadmium, chromium, lead, silver and gold in Venezuelan red mud by atomic absorption spectrometry. *Journal of Analytical Spectrometry*, 1989, vol. 4, no. 5, pp. 411–414. Available at: <https://doi.org/10.1039/JA9890400411> (accessed 13 October 2022).
 25. Ward B.C., Leybourne M.I., Sacco D.N. Drift prospecting within the QUEST project area, Central British Columbia (NTS093J): potential for porphyry copper-gold, volcanic massive sulfide mineralization and gold-copper veins. *Geoscience BC Summary of Activities 2010. Geoscience BC*, 2011, Report 2011–1, pp. 73–96.
 26. Totland M.M., Jarvis I., Jarvis K.E. Microwave digestion and alkalifusion procedures for the determination of the platinum-group elements and gold in geological materials by ICP-MS. *Chemical Geology*, 1995, vol. 124, no. 1–2, pp. 21–36. Available at: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00021-D](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00021-D) (accessed 13 October 2022).
 27. Chow A., Beamish F.E. An experimental evaluation of neutron activation, wet assay and fire assay methods of determining gold in ores. *Talanta*, 1967, vol. 14, no. 2, pp. 219–231. Available at: [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(67\)80181-4](https://doi.org/10.1016/0039-9140(67)80181-4) (accessed 13 October 2022).
 28. Balaram V., Anjiah K.V. Direct estimation of gold in geological samples by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Journal of Indian Chemical Society*, 1997, vol. 74, pp. 581–583.
 29. Pupyshv A.A. Atomic spectroscopy and atomic spectral analysis. Bibliography of Russian books on the theory, equipment and practical methods of application. *Analitika i kontrol*, 2016, vol. 20, no. 1, pp. 67–102. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.15826/analitika.2016.20.1.005> (accessed 13 October 2022).
 30. Pyrzyn'ska K. Recent developments in the determination of gold by atomic spectrometry techniques. *Spectrochimica Acta, Part B*, 2005, vol. 60, pp. 1316–1322. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2005.06.010> (accessed 13 October 2022).
 31. Grebneva-Balyuk O.N., Kubrakova I.V. Determination of platinum group elements in geological samples by inductively coupled plasma mass spectrometry: possibilities and limitations. *Journal of Analytical Chemistry*, 2020, vol. 75, no. 3, pp. 275–285. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1061934820030065> (accessed 21 October 2022).
 32. Axelsson M.D., Rodushkin I., Ingri J., Öhlander B. Multielemental analysis of Mn–Fe nodules by ICP-MS: optimisation of an analytical method. *Analyst*, 2002, vol. 127, no. 1, pp. 76–82. Available at: <https://doi.org/10.1039/b105706p> (accessed 13 October 2022).
 33. Terenteva L.A., Afanaseva L.D., Chalkova G.K., Vanifatova N.G., Torgov V.G., Zolotov Yu.A. Ekstraktsionno-atomno-absorbtsionnyy metod odnovremennogo opredeleniya zolota i serebra v geokhimicheskikh obektakh [Extraction-atomic-absorption method for the simultaneous determination of gold and silver in geochemical objects]. *Zavodskaya laboratoriya*, 1983, vol. 49, no. 8, pp. 25–29.
 34. Myagkaya I.N., Sarygool B.Yu., Lazareva E.V., Ishchuk N.V., Zhmodik S.M. Formy nakhozheniya zolota i serebra v rudakh Novo-Urskogo mestorozhdeniya (Salairskiy kryazh) [Forms of gold and silver finding in the ores of the Novo-Urskoe deposit (Salair ridge)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov*, 2017, no. 1, pp. 171–176.
 35. Kravtsova R.G., Makshakov A.S., Tauson V.L., Belozero O.Yu., Tatarinov V.V. Speciation features of gold in ores and minerals of the Nalinskoe deposit (North East Russia). *Geodynamics & Tectonophysics*, 2022, vol. 13, no. S2. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0595> (accessed 13 October 2022).
 36. *Opreделение zolota v gornykh porodakh, rudakh i produktakh ikh pererabotki ekstraktsionno-atomno-absorbtsionnym metodom s organicheskimi sulfidami (metodika NSAM 237-S)* [Determination of gold in rocks, ores and products of their processing by the extraction-atomic absorption method with organic sulfides (NSAM 237-C) technique]. Moscow, VIMS Publ., 2016. 18 p.

37. Chursanov Y.V., Starovoytov A.V. Atomic absorption determination of gold in electrothermal atomizer after separation by coprecipitation with tellurium. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya*, 2013, no. 15, pp. 18–24. In Rus.
38. Zolotov Yu.A. *Ocherki analiticheskoy khimii* [Essays in analytical chemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 240 p.
39. Yudelevich I.G., Startseva E.A. *Atomno-absorbtsionnoe opredelenie blagorodnykh metallov* [Atomic absorption determination of noble metals]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 159 p.
40. Ivanov V.V., Khanchuk A.I., Mikhailik P.E. Nature of native gold in ferromanganese crusts on the seafloor of the northwestern Pacific Ocean. *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 497, no. 1, pp. 223–226. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1028334X2103003X> (accessed 27 October 2022).
41. *Baza dannykh po geokhimicheskim, ekologicheskim i biologicheskim etalonnym materialam* [Database on geochemical, environmental and biological reference materials]. Available at: <http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/> (accessed 27 October 2022).
42. OST 41-08-212-04. *Upravlenie kachestvom analiticheskikh rabot. Normy pogreshnosti pri opredelenii khimicheskogo sostava mineralnogo syrya i klassifikatsiya metodik laboratornogo analiza po tochnosti rezultatov* [Industrial Standard 41-08-212-04. Analytical quality management. Norms of error in determining the chemical composition of mineral raw materials and classification of laboratory analysis methods according to the accuracy of the results]. Moscow, VIMS Publ., 2004. 23 p.

Received: 31 October 2022.

Reviewed: 9 November 2022.

Information about authors

Maksim G. Blokhin, Cand. Sc., deputy director for science, Far East Geological Institute FEB RAS.

Natalya V. Zarubina, researcher, Far East Geological Institute FEB RAS.

Vladimir V. Ivanov, Cand. Sc., leading researcher, head of laboratory, Far East Geological Institute FEB RAS.

Pavel E. Mikhailik, Cand. Sc., senior researcher, Far East Geological Institute FEB RAS.

УДК 621.311.26

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Обухов Сергей Геннадьевич¹,
serob@tpu.ru

Давыдов Денис Юрьевич¹,
denisyudavydov@gmail.com

Белоглазкин Алексей Олегович²,
rcktgroupp@gmail.com

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² ООО «Рокет групп»,
Россия, 123290, г. Москва, 1-й Магистральный туп., 5а, эт. 1, ком 132л, оф. 3.

Актуальность. В настоящее время строительный сектор является одним из крупнейших потребителей сырьевых ресурсов и основным источником загрязнения окружающей среды – на его долю приходится около 40 % потребляемой энергии и примерно 30 % выбросов парниковых газов. В результате выбросов в атмосферу продуктов сгорания угля, нефти и газа наносится непоправимый урон окружающей среде. Одним из перспективных способов решения данной проблемы является внедрение технологий «энергоэффективное здание». Ключевой задачей проектирования энергоэффективных зданий является разработка системы электроснабжения, которая во многом определяет уровень комфорта и технико-экономические показатели всего объекта. Сложность данной задачи обусловлена тем, что в качестве источников электропитания часто применяются установки на основе возобновляемых источников энергии, характеризующиеся стохастической генерацией, а сами энергоэффективные здания могут существенно отличаться друг от друга по целому ряду параметров: назначению, архитектуре, размеру и этажности, составу потребителей и т. д. В статье предложена инженерная методика проектирования подобных объектов и результаты ее апробации.

Цель: разработка инженерной методики проектирования систем электроснабжения автономных энергоэффективных зданий на основе возобновляемых источников энергии.

Методы: методы статистической обработки временных рядов данных, математическое и компьютерное моделирование с использованием программной среды MatLab/Simulink.

Результаты. Предложена инженерная методика проектирования систем электроснабжения автономных объектов, ориентированная на проектирование «активных» зданий с максимально возможным использованием возобновляемых источников энергии. Описаны основные этапы проектирования, которые включают расчет и анализ энергетического баланса, выбор основного электрооборудования и разработку структурной схемы электроэнергетической системы, оптимизацию состава и типоразмеров основного электрооборудования, выбор коммутационных и защитных аппаратов, проводниковой продукции, разработку принципиальных электрических схем. Рассмотрен практический пример применения предложенной методики для проектирования системы электроснабжения автономного энергоэффективного здания в Курской области.

Ключевые слова:

энергоэффективное здание, возобновляемые источники энергии, временные ряды, гибридные электроэнергетические системы, энергетический баланс, автономная система электроснабжения.

Введение

Глобальной проблемой современной цивилизации является изменение климата, во многом обусловленное выбросами в атмосферу продуктов сгорания органического топлива. По данным международного исследовательского проекта по мониторингу выбросов парниковых газов Global Carbon Project, в 2021 г. выбросы углекислого газа во всем мире увеличились на 4,9 % по сравнению с 2020 г. и достигли отметки в 36,7 млрд т [1]. В целях борьбы с изменением климата и его негативными последствиями в 2015 г. 197 стран мира приняли Парижское соглашение [2], целью которого является сокращение глобальных выбросов парниковых газов и ограничение повышения глобальной температуры в этом столетии до 2 градусов Цельсия.

Достижение поставленной цели невозможно без внедрения новых энергоэффективных технологий, базирующихся на экологически чистых источниках энергии. Одной из таких технологий, получивших бурное развитие в последние годы, является технология «энергоэффективное здание». Необходимость развития и широкомасштабного внедрения данной технологии обусловлена тем, что именно строительный сектор является основным источником загрязнения окружающей среды – на его долю приходится около 40 % потребляемой энергии и примерно 30 % выбросов парниковых газов. На саммите ООН по климату 2019 г. было объявлено о глобальной инициативе «Здания с нулевым выбросом углерода для всех», направленной на то, чтобы к 2030 г. все новые здания отвечали требованиям нулевого потребления

энергии, а существующие здания – к 2050 г. С учетом того, что в настоящее время только около 1 % зданий соответствуют этому требованию, практическая реализация инициативы ООН потребует привлечения огромных финансовых вложений в декарбонизацию зданий – не менее 1 трлн долларов США до 2030 г.

Проведенный тематический литературный обзор показал, что проблеме развития и совершенствования технологии энергоэффективных зданий посвящено большое число современных исследований, которые проводятся во многих странах мира. Результаты анализа факторов, требований и сертификатов, определяющих энергоэффективность зданий, представлены в работах [3–5], вопросы оптимизации энергопотребления зданий рассмотрены в работах [6–8], моделированию энергетических характеристик и технико-экономическому обоснованию применения энергоэффективных зданий посвящены работы [8–11]. Примеры практической реализации проектов энергоэффективных зданий с подробным описанием используемых технологий приведены в работах [12–14].

Однако, несмотря на большое число публикаций, посвященных энергоэффективным зданиям, вопросы разработки и проектирования схем электроснабжения таких объектов практически не рассматриваются. Кроме того, на сегодняшний день отсутствуют нормативные документы, устанавливающие требования к проектированию систем электроснабжения энергоэффективных зданий. Применение нормативно-правовой базы, используемой при проектировании жилых и общественных зданий, не позволяет в полной мере решить обозначенную проблему в силу того, что система электроснабжения энергоэффективных зданий имеет ряд особенностей. Эти особенности определяются тем, что в качестве источников электропитания часто применяются установки на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), характеризующиеся стохастической генерацией, а сами энергоэффективные здания могут существенно отличаться друг от друга по целому ряду параметров: назначению, архитектуре, размеру и этажности, составу потребителей и т. д.

С учетом того, что система электроснабжения энергоэффективного здания во многом определяет уровень комфорта и технико-экономические показатели проектируемого объекта, разработка инженерной методики проектирования подобных систем является важной и актуальной задачей.

Постановка задачи и методы исследования

Основным стимулом к проведению настоящих исследований послужила разработка проекта системы электроснабжения автономных модульных домов, производимых компанией Rocket Group [15]. Реализация проекта потребовала учета целого ряда специфических требований и ограничений, характерных для систем электроснабжения автономных энергоэффективных зданий. В результате была разработана инженерная методика проектирования систем электроснабжения автономных энергоэффективных зданий на основе ВИЭ, результаты апробации которой представлены в настоящей работе.

Компания Rocket Group является приверженцем концепции достижения максимальной гармонии между человеком и окружающим миром природы. Данную концепцию компания реализует через автономные модульные дома, которые позволяют сделать жизнь людей свободнее и комфортнее и при этом сберечь окружающую среду.

В основу технологии автономных модульных домов положены следующие принципы:

- должен быть обеспечен высокий уровень комфорта и надежности;
- конструкция дома должна обеспечивать простоту его перемещения и установку в разных, в том числе и труднодоступных местах;
- в качестве основных источников энергии должны использоваться установки возобновляемой энергии.

Данные требования позволяют сформулировать набор условий, необходимых для реализации конечной цели проекта:

1. Основной источник энергии для электроснабжения модульного дома должен быть возобновляемым, повсеместно доступным, а энергоустановка на его основе должна быть совместима с конструкцией дома. Из известных технологий возобновляемой энергетики данным условиям соответствуют фотоэлектрические станции (photovoltaic station – PVS) и ветроэнергетические установки (wind turbines – WT).
2. Резко-переменный характер генерации основного источника энергии вызывает необходимость применения накопителя энергии. С учетом того, что коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) как PVS, так и WT относительно небольшой, требование обеспечения максимальной автономии вызывает необходимость применения основного генерирующего источника достаточной установленной мощности – в 4–5 раз больше среднесуточной электрической нагрузки. Соответственно, в данных условиях необходим накопитель энергии, обладающий хорошими зарядно-разрядными характеристиками, что обеспечит максимально эффективное использование доступной возобновляемой энергии. Этим требованиям наилучшим образом соответствуют литий-ионные аккумуляторные батареи (accumulator battery – AB).
3. Для обеспечения высокой надежности электроснабжения потребителей в составе проектируемой системы необходим гарантированный источник энергии, в качестве которого целесообразно использовать бензо- или дизель-генератор (GEN).

Необходимым условием проектирования изолированных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии является достоверный прогноз и тщательный анализ энергетического баланса, который определяет требования к техническим характеристикам основного генерирующего оборудования и системам управления. При решении подобных задач широко применяют методы имитационного модели-

рования режимов электроэнергетической системы, обеспечивающие оптимальный выбор состава и типов размеров основного электрооборудования [16]. Для достижения поставленной цели исследования предлагается использовать инженерную методику, включающую выполнение четырех последовательных этапов, описанных ниже.

Расчет и анализ энергетического баланса

Первоочередной задачей является прогноз режимов электропотребления по сезонам года и расчет максимальной электрической нагрузки проектируемого объекта. Именно данные параметры определяют выбор установленной мощности основного электрооборудования, и, соответственно, адекватность всех дальнейших расчетов.

В табл. 1 показана сводная ведомость электрических нагрузок автономного модульного дома, дополненная значениями коэффициента спроса K_c , полученных по результатам анализа большого количества проектов и паспортных данных бытовых электроприборов [17].

Таблица 1. Ведомость электрических нагрузок автономного модульного дома

Table 1. Modular house electrical load listing

Тип потребителя Electrical load	Номинальная мощность, Вт Rated power, W	Время работы, часов Operating time, hours	Среднесуточное потребление, Вт·ч. Daily average load demand, Wh	K_c
Теплые полы Underfloor heating	2000	5	10000	0,5
Бойлер/Water heater	1500	2	3000	0,6
Кондиционер/Air conditioner	400	7	2800	0,7
Рекуператор/Recuperator	80	6	480	0,8
Насосная станция/Pump	600	1	600	0,8
Чайник/Kettle	1500	0,15	225	0,3
Холодильник/Refrigerator	150	18	2700	0,8
Индукционная варочная поверхность Inductive cooktop	1500	1	1500	0,8
Микроволновая печь Microwave oven	800	0,5	400	0,3
Освещение внутреннее Indoor light	150	5	750	1,0
Освещение наружное Outdoor light	50	3	150	1,0
Проектор Home cinema projector	120	5	600	0,3
Прочее Miscellaneous electrical loads	100	3	300	0,4

Максимальная расчетная нагрузка модульного дома в соответствии с нормативами по СП 31-110-2003 [18] определяется по следующему выражению:

$$P_{\max} = \sum P_{\text{ит}} K_c = 5,01 \text{ кВт.}$$

Для построения характерных суточных графиков нагрузок проектируемого объекта использовалась методика и справочные материалы из РД 34.20.178 [19]. Данным прогнозным графикам соответствуют следу-

ющие значения среднесуточного потребления электроэнергии: зима – 24,9 кВт·ч, весна – 16,1 кВт·ч, лето – 11,5 кВт·ч, осень – 17,0 кВт·ч.

Особенностью настоящего проекта являются технические ограничения по выбору количества, размеров и типа используемых солнечных панелей (solar panel – SP). Смысл данных ограничений состоит в размещении SP максимально возможной установленной мощности в габаритах модульного дома, что обеспечит простоту изменения его географической локации.

На рис. 1 показаны планы фасадов и крыши модульного дома с предполагаемыми местами размещения SP. Конструкция модульного дома предполагает использование части SP на фасадах в качестве элементов строительной отделки стен, соответственно жестко закрепленных. При этом имеется техническая возможность изменения наклона и ориентации 12 солнечных панелей на крыше модульного дома.

В данном проекте запланировано использование фотоэлектрических модулей (photovoltaic module – PVM) монокристаллического типа, изготовленных по технологии PERC Half-Cell, мощностью 400 Вт, обеспечивающих высокую энергетическую эффективность в условиях частичного затенения.



Рис. 1. Планы крыши и фасадов модульного дома с предполагаемыми местами размещения солнечных панелей

Fig. 1. Schematic view of roof and exterior walls of modular house with suggested PV-panels placements

Для расчета генерируемой PVS электроэнергии использовалось программное обеспечение, построенное на основе оригинальных математических моделей солнечной радиации и фотоэлектрического модуля,

подробно описанных в работах [20, 21]. Исходными данными моделирования являются географические координаты размещения гелиоустановки, азимутальный и наклонный углы ориентации солнечной батареи, номер моделируемого дня года, индекс прозрачности атмосферы, альbedo земной поверхности и тип солнечного трекера.

Расчетные значения среднесуточной энергии, генерируемой одной SP мощностью 400 Вт, для предполагаемого места установки автономного модульного дома (Курская область, 51°43' с.ш., 36°11' в.д.) показаны в табл. 2.

Таблица 2. Среднесуточная энергия, генерируемая одной солнечной панелью мощностью 400 Вт, в декабре, кВт·ч

Table 2. Average daily energy generated by one solar panel with capacity 400 W in December, kWh

Угол наклона, град PV tilt angle, deg	Восток East	ЮВ S-E	Юг South	ЮЗ S-W	Запад West	СЗ N-W	Север North	СВ N-E
0	0,332	0,332	0,332	0,332	0,332	0,332	0,332	0,332
5	0,332	0,369	0,384	0,368	0,332	0,295	0,279	0,295
10	0,331	0,403	0,434	0,403	0,331	0,26	0,227	0,26
15	0,33	0,436	0,481	0,436	0,33	0,231	0,193	0,232
20	0,33	0,466	0,526	0,466	0,329	0,211	0,192	0,211
25	0,329	0,494	0,568	0,494	0,329	0,199	0,191	0,199
30	0,329	0,52	0,606	0,519	0,328	0,193	0,189	0,193
35	0,327	0,543	0,642	0,542	0,327	0,189	0,187	0,189
40	0,326	0,562	0,673	0,561	0,325	0,186	0,185	0,186
45	0,323	0,579	0,701	0,578	0,323	0,184	0,183	0,184
50	0,32	0,592	0,724	0,591	0,319	0,181	0,18	0,181
55	0,317	0,602	0,743	0,601	0,316	0,178	0,177	0,178
60	0,312	0,609	0,758	0,608	0,311	0,175	0,175	0,175
65	0,307	0,612	0,768	0,611	0,306	0,172	0,171	0,172
70	0,3	0,612	0,774	0,611	0,299	0,169	0,168	0,169
75	0,293	0,609	0,775	0,608	0,292	0,165	0,165	0,165
80	0,285	0,602	0,771	0,601	0,284	0,162	0,162	0,162
85	0,277	0,592	0,763	0,59	0,276	0,158	0,158	0,158
90	0,268	0,578	0,75	0,577	0,267	0,155	0,155	0,155

Результаты расчетов показывают, что максимальную выработку электроэнергии в зимний период в рассматриваемом месте размещения модульного дома можно получить, если расположить его главным фасадом на Север (рис. 1), а SP на крыше сориентировать на Юг под оптимальным для зимы углом наклона 70–75 градусов. Результаты расчета потенциальной выработки энергии PVS в декабре представлены в табл. 3.

Таблица 3. Среднесуточная энергия, генерируемая солнечной батареей в декабре, кВт·ч

Table 3. PV module daily average energy yield (December)

Панели PV-panels placement	Кол-во СП Number of PV	Ориентация Orientation	Угол Tilt angle	W, кВт·ч/kWh	
				1 СП 1 PV	Сумма Total
Главный фасад Principal front of modular house	4	С	90	0,1547	0,6188
Задний фасад C-side of modular house	5	Ю	90	0,75	3,75
Крыша/Roof	12	Ю	70	0,774	9,288

Выполненные расчеты показывают, что даже при оптимальном размещении SP на модульном доме суммарная среднесуточная декабрьская генерация составит 13,65 кВт·ч электроэнергии, что не обеспечит полного покрытия зимнего электропотребления.

Для оценки потенциальных возможностей WT по выработке электроэнергии и целесообразности ее применения в качестве дополнительного генерирующего источника выбрана классическая трехлопастная модель ВЭУ с горизонтальной осью вращения, номинальной мощностью 3 кВт, с типичными для моделей данного класса характеристиками. Выбор данной модели обоснован тем, что применение ВЭУ большей мощности сложно совместить с конструкцией здания.

В качестве исходных метеорологических данных для расчета ветроэнергетического потенциала использовались данные метеостанции, расположенной вблизи г. Курска [22]. Основные сведения о метеостанции и характеристики временного ряда приведены на рис. 2.

Для оценки ветроэнергетического потенциала на высоте, отличающейся от базовой, использовался метод вертикальной экстраполяции профиля скорости ветра посредством пересчета оценок параметров распределения Вейбулла (методика *Spera-Richards*) [23].

Оценка среднемесячной величины выработки электроэнергии WT определялась по следующей формуле:

$$W_i = P_{wt}(v) \cdot \rho_{i,ave} \cdot f(v, c_i, k_i) \cdot 8760,$$

где W_i – средняя расчетная выработка электроэнергии WT в i -й месяц; $P_{wt}(v)$ – зависимость мощности генерируемой WT от скорости ветра (определяется путем интерполяции энергетической характеристики выбранной WT по градиентам скорости ветра v); $\rho_{i,ave}$ – среднемесячная плотность воздуха, кг/м³; $f(v, c_i, k_i)$ – функция плотности распределения Вейбулла (c_i, k_i – оценки параметров масштаба и формы для i -ого месяца).

Результаты расчета выработки электроэнергии WT для различных высот расположения оси ветроколеса сведены в табл. 4.

Таблица 4. Оценка среднемесячной выработки электроэнергии ветротурбиной на высоте оси ветроколеса $h=10, 14, 18$ и 20 м

Table 4. Estimated monthly average electricity production of wind turbine at different hub height ($h=10, 14, 18, 20$ meters)

Месяц/Month	Расчетная выработка электроэнергии ВЭУ W, кВт·ч Estimated electricity generation of wind turbine W, kWh			
	h=10 m/m	h=14 m/m	h=18 m/m	h=20 m/m
Январь/January	69,4	100,8	126,1	137,0
Февраль/February	74,5	106,1	131,3	142,0
Март/March	87,4	121,3	147,7	158,7
Апрель/April	64,8	92,3	114,2	123,5
Май/May	30,3	45,9	59,0	64,7
Июнь/June	22,3	34,6	45,1	49,8
Июль/July	16,3	25,8	33,9	37,6
Август/August	11,7	19,4	26,3	29,3
Сентябрь/September	26,4	40,5	52,5	57,8
Октябрь/October	36,2	53,9	68,6	75,1
Ноябрь/November	62,5	90,8	113,8	123,7
Декабрь/December	85,0	120,9	149,5	161,6
Год/Annual	586,7	852,3	1068,0	1160,9



Рис. 2. Расположение и основные сведения о метеостанции и характеристики временного ряда данных
Fig. 2. Geographical location of the weather station with basic information about site and characteristics of available time-series data

Полученные результаты оценки ветроэнергетического потенциала и выработки электроэнергии WT показывают, что применение WT в качестве дополнительного источника энергии в рассматриваемом регионе нецелесообразно. Среднегодовой КИУМ WT составляет всего 0,022 при ее установке на высоте 10 м, и 0,044 на высоте 20 м. Прогнозируемая среднесуточная выработка электроэнергии (для высоты 20 м) в январе и феврале составляет около 4,5 кВт·ч.

Практический смысл рассматривать WT в качестве потенциального генерирующего источника имеет смысл при величине КИУМ WT > 0,2, при этом окончательный выбор типоразмера установки производится по результатам имитационного моделирования рабочих режимов электроэнергетической системы и решения оптимизационной задачи на третьем этапе предложенной методики.

Выбор основного электрооборудования и разработка структурной схемы электроэнергетической системы

Важной технической задачей проектирования гибридных электроэнергетических систем является определение рациональной архитектуры их построения. По архитектуре (или топологии) различают два основных варианта построения гибридных систем: с сопряжением генерирующих источников на постоянном или переменном токе, также возможны разнообразные варианты смешанных схем подключения. Каждая архитектура имеет свои достоинства и недостатки, и преимущественную область применения.

На основе проведенного анализа требований к проектируемой системе электроснабжения представляется целесообразным выбрать в качестве базовой конфигурации смешанную архитектуру построения системы (рис. 3).

Выбор данной конфигурации автономной системы электроснабжения обоснован тем, что основным генерирующим источником в проектируемой системе является PVS. Важными достоинствами данной архитектуры является эффективное использование доступной солнечной энергии и органического топлива, чем и достигается высокий уровень автономности.

В зависимости от внешних условий, текущего состояния оборудования и режимов электропотребления рассматриваемая система может функционировать в нескольких режимах.

Режим 1. При высокой интенсивности солнечного излучения обеспечивается полное покрытие электрических нагрузок и заряд АВ энергией, генерируемой PVS.

Режим 2. Нагрузка покрывается энергией от PVS и АВ, а если Солнца нет, то только от АВ. В этом режиме обеспечивается контроль остаточной емкости АВ, и при ее снижении ниже установленного порогового значения производится запуск генератора (GEN).

Режим 3. Покрытие электрической нагрузки и заряд АВ обеспечиваются от GEN. При увеличении остаточной емкости АВ выше установленного порогового значения с помощью коммутатора К производится переключение на питание нагрузки от автономного инвертора АИ (режим 1 или 2).

При такой логике функционирования системы можно использовать достаточно простую схемотехнику для построения автономного инвертора, так как в данном случае от него не требуется реализация функции droopcontrol, обеспечиваемой регулированием значений выходной частоты и напряжения. В режиме 3 обеспечивается прямое (без внешних преобразователей) подключение генератора к нагрузке, что обеспечивает эффективное использование топлива.

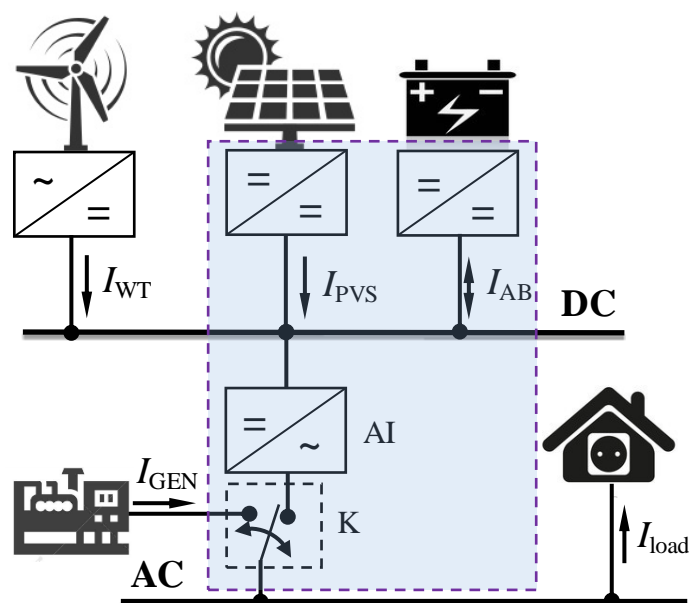


Рис. 3. Структурная схема построения гибридной электростанции с ВИЭ по смешанной топологии
 Fig. 3. Structure flowchart of hybrid renewable power supply system with mixed topology

Веским аргументом в пользу выбранной топологии является наличие на рынке унифицированных солнечных гибридных инверторов, которые содержат практически все необходимые для функционирования системы встроенные электронные компоненты (на рис. 3 выделены прямоугольником). В последние годы производство инверторов данного типа освоили многие азиатские производители, они выпускаются в широком ассортименте и обладают хорошим соотношением цена/качество.

Для построения гибридной системы электроснабжения по смешанной топологии, представленной на рис. 3, требуется гибридный двухходовой инвертор с величиной мощности по постоянному току (DC входу) не менее 9 кВт, по переменному току (AC входу) не менее 5,01 кВт. Наиболее распространенными моделями гибридных инверторов данного класса являются модели с величиной напряжения DC входа – 48 В. Выбор данного напряжения позволяет с одной стороны уменьшить сечения проводников и снизить потери по сравнению с моделями на 12 и 24 В, с другой стороны – использовать готовые сборки АВ без необходимости их последовательного соединения и применения ВМС, в сравнении с моделями на 96 В и выше.

Приемлемым вариантом является модель гибридного инвертора номинальной выходной мощностью по AC входу 8 кВт, которая представлена на рынке несколькими известными производителями силовой электроники. Данная модель инвертора обеспечивает максимальную мощность по DC входу более 10 кВт и комплектуется двумя встроенными солнечными контроллерами точки максимальной мощности (maximum power point tracker – MPPT).

Определим необходимую минимальную емкость АВ $Q_{\text{batt.min}}$ (кВт·ч) по требуемому числу часов питания T_{batt} потребителей от АВ при отсутствии генерации от возобновляемых источников:

$$Q_{\text{batt.min}} = \frac{E_L T_{\text{batt}}}{24 DOD \eta_{\text{ch}} \eta_{\text{dch}}}, \quad (1)$$

где $DOD=80\%$ – допустимый уровень разряда литий-железо-фосфатных аккумуляторов; $\eta_{\text{ch}}, \eta_{\text{dch}}$ – коэффициенты полезного действия преобразователей в режиме заряда/разряда АВ, соответственно (примем $\eta_{\text{ch}}=0,9, \eta_{\text{dch}}=0,95$); $E_L=24,9$ кВт·ч – значение средне-суточной величины энергии, потребляемой нагрузкой в самый энергодефицитный месяц – декабрь.

Примем в первом приближении минимальное значение числа часов питания потребителей от АВ при отсутствии генерации от возобновляемых источников $T_{\text{batt}}=6$ часов. В результате вычислений по выражению (1) получим $Q_{\text{batt.min}}=9,1$ кВт·ч, что в пересчете на 48 В соответствует емкости АВ $C_{\text{batt}}=190$ А·ч. Принимаем для проведения технико-экономического анализа комплектный блок АВ Battery LiFePO4 Cells 48V номинальной емкостью 200 А·ч.

Заключительным этапом выбора электрооборудования является определение номинальной мощности гарантированного источника питания – генератора (GEN). В данном проекте в качестве гарантированного источника питания целесообразно применение бензогенератора инверторного типа, достоинствами которого является практически неизменный удельный расход топлива в широком диапазоне нагрузок.

Выбор необходимой мощности генератора P_{GEN} для работы в длительном режиме осуществляется по условию покрытия максимальной мощности нагрузки P_{max} и зарядной мощности P_{ch} АВ:

$$P_{\text{GEN}} > P_{\text{max}} + P_{\text{ch}} = P_{\text{max}} + 0,2 C_{\text{batt}} N_{\text{batt}} V_{\text{batt}},$$

где N_{batt} – количество блоков АВ, используемых в гибридной системе.

Для проведения технико-экономических расчетов выбираем модель генератора номинальной мощностью для длительного режима 9,0 кВт.

Оптимизация состава и типоразмеров основного электрооборудования

Основной задачей данного этапа является определение оптимальных размеров (номинальных мощностей) основного электрооборудования на основе сравнительной оценки технико-экономических показателей проектируемой системы электроснабжения. В качестве исходных данных при выполнении исследований используются технико-экономические характеристики предварительно выбранного оборудования, определенные в предыдущем разделе.

Оптимизация оборудования гибридных систем электроснабжения (hybrid power supply system – HPSS) выполняется за три последовательных этапа. На первом этапе расчетов формируются временные ряды климатических данных (солнечной радиации, скорости ветра и температуры воздуха) и график электрических нагрузок потребителя электроэнергии. Основой формирования временных климатических рядов являются географические координаты размещения HPSS и данные многолетних метеорологических наблюдений. Построение графиков электрических нагрузок осуществляется с использованием вероятностно-статистической модели электрических нагрузок децентрализованного потребителя. Исходными данными для выполнения первого этапа расчетов являются данные метеорологических сайтов и базы данных Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA). В данной работе используются временные ряды продолжительностью в один год с дискретизацией в один час, которые преимущественно применяются для решения задач оптимизации HPSS.

На втором этапе расчетов выполняется моделирование рабочих режимов HPSS, по результатам которого определяются технические показатели проектируемой электроэнергетической системы. Имитационная модель HPSS с ВИЭ реализована в программном комплексе MatLab/Simulink. Исходными данными для выполнения данного этапа расчетов служат основные технические характеристики энергетического оборудования HPSS, установленные по данным их технической спецификации.

Оптимизация состава оборудования HPSS выполняется на заключительном третьем этапе расчетов. Оптимизационная задача решается с использованием специализированного программного модуля, реализованного в виде библиотеки программ-функций MatLab. Описание используемого программного обеспечения приведено в работах [24, 25].

Следует отметить, что в данном конкретном случае нет необходимости в постановке и решении полной оптимизационной задачи с применением метаэвристических математических алгоритмов. Обосновано это тем, что оптимальное количество и тип SP установлены на предварительном этапе исследований (рис. 1), а тип и номинальную мощность инвертора определяет принятая архитектура электростанции и параметры нагрузки. Соответственно, в данном случае нужно оптимизировать только количество блоков АВ, и по полученным результатам можно скорректировать пред-

варительно принятую мощность генератора. Таким образом, задача оптимизации сводится к имитационному моделированию режимов работы HPSS на длительном (годовом) временном интервале с определением основных технико-экономических показателей проектируемой системы: экономические показатели, степень автономности, расход топлива и др. На основе сравнительного анализа полученных результатов моделирования и определяется лучший вариант.

В качестве основных экономических показателей используются два параметра: приведенная стоимость жизненного цикла (life cycle cost – LCC) и выровненная стоимость генерируемой электроэнергии (levelized cost of electricity – LCOE).

Стоимость жизненного цикла, или общие затраты на электроэнергетическую систему в течение всего ее срока службы, определяется по уравнению:

$$LCC = C_{\text{cap}} + C_{\text{main}},$$

где C_{cap} – общие капитальные затраты на проект; C_{main} – стоимость технического обслуживания.

Выровненная стоимость электроэнергии определяется по уравнению:

$$LCOE = \frac{LCC}{E_{\text{year}}},$$

где E_{year} – годовой объем электроэнергии, полученный потребителем от HPSS с ВИЭ.

За продолжительность жизненного цикла принимается срок службы одного из всех компонентов HPSS, имеющих максимальное заявленное производителем значение (в данном примере $T=25$ лет соответствует солнечным панелям).

Фактор времени при распределении капитальных затрат в течение жизненного цикла объекта учитывается с помощью коэффициента возврата капитала (capital recovery factor – CRF):

$$CRF = \frac{i \cdot (1+i)^T}{(1+i)^T - 1},$$

где i – процентная банковская ставка; T – общий срок службы энергетической системы.

Сроки службы отдельных компонентов HPSS могут значительно различаться, поэтому их необходимо привести к условиям единовременного платежа. Например, если в составе HPSS используется АВ с гарантированным сроком службы 5 лет, а значение жизненного цикла системы принято равным $T=25$ лет, приведенная стоимость АВ C_{batt} определяется по следующему выражению:

$$C_{\text{batt}} = C_{\text{batt0}} \cdot \left(1 + \frac{1}{(1+i)^5} + \frac{1}{(1+i)^{10}} + \frac{1}{(1+i)^{15}} + \frac{1}{(1+i)^{20}} \right), \quad (2)$$

где C_{batt0} – первоначальная цена АВ.

Срок службы дизель-генераторных установок и бензогенераторов измеряется количеством моточасов до капитального ремонта, поэтому их приведенная стоимость рассчитывается по аналогичной (2) формуле после определения их срока службы по уравнению:

$$T_{\text{GEN}} = \frac{H_{\text{OV}}}{H_{\text{F}}}, \text{ лет,}$$

где H_F – количество часов работы генератора в год, рассчитанное по результатам имитационного моделирования; H_{OV} – количество моточасов до капитального ремонта, заявленное производителем.

Для HPSS в рассматриваемой конфигурации суммарные приведенные капитальные затраты определяются по уравнению:

$$Cap = CRF \cdot (N_{SP} \cdot C_{SP} + N_{batt} \cdot C_{batt} + C_{GEN} + C_{inv}),$$

где N_{SP} , C_{SP} – количество и стоимость солнечных панелей; N_{batt} , C_{batt} – количество и приведенная стоимость аккумуляторных батарей; C_{GEN} – приведенная стоимость бензогенератора; C_{inv} – приведенная стоимость инвертора.

Пренебрегая затратами на обслуживание инвертора, суммарные затраты на техническое обслуживание HPSS определяются по уравнению:

$$Main = N_{SP} \cdot M_{SP} + N_{batt} \cdot M_{batt} + M_{GEN} + M_{fuel},$$

где M_{SP} , M_{batt} , M_{GEN} – ежегодные затраты на техническое обслуживание SP, AB и бензогенератора; M_{fuel} –

затраты на топливо, расход которого определяется по результатам моделирования режимов.

Искомыми переменными оптимизационной задачи в данном случае является число аккумуляторов в аккумуляторной батарее N_{batt} , при которых обеспечивается минимальное значение LCOE. В зависимости от рассматриваемой конфигурации HPSS для искомых переменных могут быть установлены дополнительные ограничения.

Результаты имитационного моделирования и сравнительного технико-экономического анализа показали, что оптимальным вариантом является система электроснабжения с 2 блоками AB, со следующими значениями экономических показателей: $Cap = \$1745$, $Main = \$815$, $LCC = \$2560$, $LCOE = \$0,405$.

Графическое представление обобщенных результатов моделирования режимов HPSS представлено в виде месячного графика энергетического баланса и диаграммы, отображающей долю каждого компонента (рис. 4). Диаграмма распределения экономических затрат на компоненты системы показана на рис. 5.

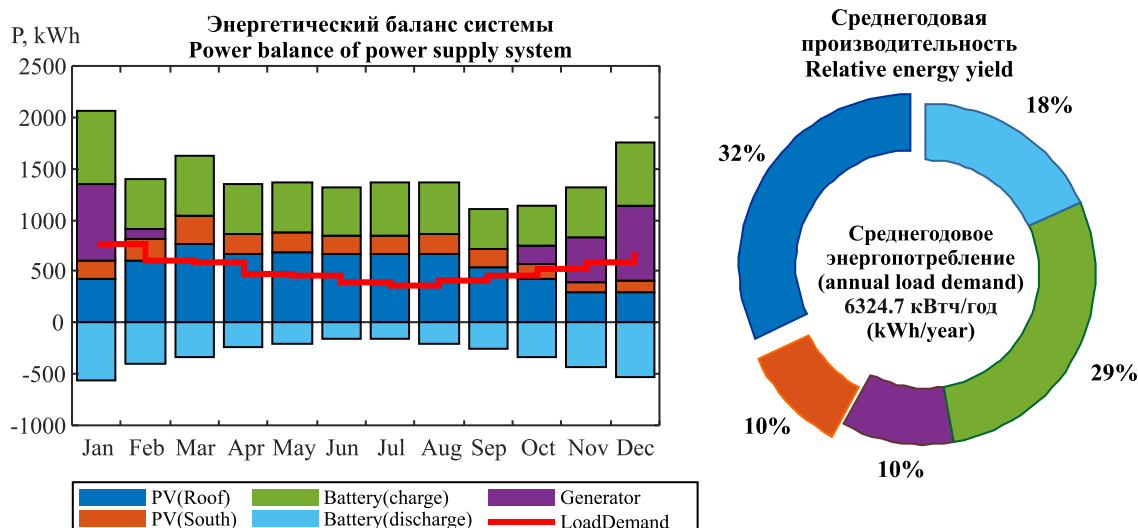


Рис. 4. Среднемесячный энергетический баланс и производительность энергетической системы
 Fig. 4. Monthly-averaged power balance and year wise relative energy yield of power supply system components

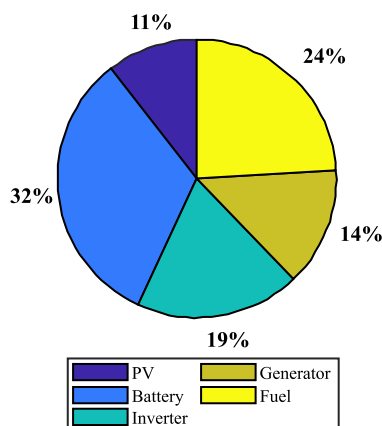


Рис. 5. Диаграмма распределения экономических затрат на компоненты энергетической системы
 Fig. 5. Cost breakdown diagram of hybrid power supply system

Анализ полученных результатов показывает, что выбранная конфигурация HPSS обеспечивает достаточно высокий уровень автономности. Большую часть года, с марта по сентябрь включительно, генерируемой энергии от SP достаточно для полного покрытия электрической нагрузки. В зимние периоды года дефицит потребляемой энергии покрывается генератором, при этом за сутки он вводится в работу только один раз, а среднее время включения составляет около 4 часов.

Выбор коммутационных и защитных аппаратов, проводниковой продукции, разработка принципиальных электрических схем

Основным компонентом проектируемой системы электроснабжения является гибридный инвертор, с помощью которого обеспечивается объединение электрооборудования в единую систему и настройка

ее функциональных возможностей. Важной характеристикой гибридного инвертора является количество и технические параметры солнечных MPPT-контроллеров, которые определяют целесообразную конфигурацию PVS. Ниже приведен практический пример выбора рациональной конфигурации PVS для гибридного инвертора со следующими характеристиками:

- количество MPPT-контроллеров – 2;
- рабочий MPPT диапазон – 150–425 В;
- номинальное входное напряжение PV-массива – 370 В (125 В ~ 500 В);
- максимальный входной ток PV-массива – 26+26 А.

В соответствии с заданными характеристиками MPPT-контроллеров необходимо разделить все имеющиеся в наличии SP на группы. Для обеспечения максимально эффективного использования доступной солнечной энергии рекомендуется придерживаться следующих правил:

1. В последовательную цепочку можно включать SP только одного типа с идентичной ориентацией в пространстве.

2. Количество SP в параллельных цепях должно быть одинаковым.

Исходя из данных условий, рациональным вариантом представляется следующий:

1. Две параллельные цепи по 6 последовательных панелей в каждой (крыша) подключаются к первому MPPT-контроллеру.
 2. Цепочка из 5 последовательных панелей (стена Юг) подключается ко второму MPPT-контроллеру.
- Полезно использовать энергию, генерируемую четырьмя солнечными панелями, расположенными на северной стене здания, в данной конфигурации системы не представляется возможным, и данный вопрос требует отдельного рассмотрения.

Для построения полнофункциональной схемы электростанции кроме основного электрооборудования необходимо использовать целый ряд дополнительных компонентов, обеспечивающих необходимый уровень защиты, надежности энергетической системы и т. п. Разработанная в результате проведенных исследований блочно-монтажная схема системы электроснабжения автономного модульного дома показана на рис. 6.

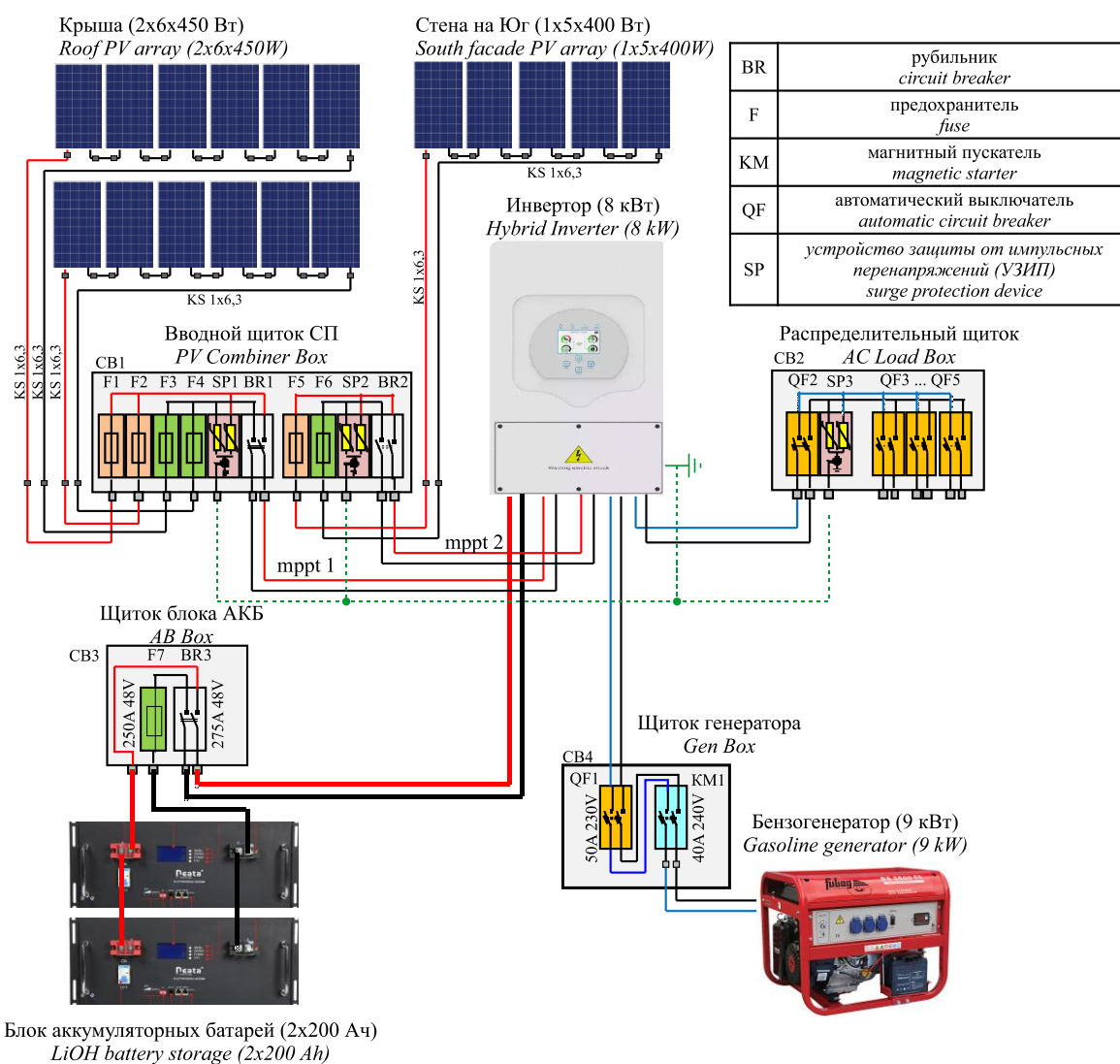


Рис. 6. Блочно-монтажная схема гибридной системы электроснабжения автономного модульного дома
 Fig. 6. Connection layout diagram of hybrid power supply system of autonomous modular house

На схеме, приведенной на рис. 6, показана только силовая часть энергетической системы. Информационные линии связи и оборудование передачи данных не обозначены. Их подключение и настройка выполняются в соответствии с руководством по эксплуатации гибридного инвертора.

Блоки подключения силового оборудования имеют следующее функциональное назначение:

1. Блок СВ1 обеспечивает токовую защиту инвертора от коротких замыканий и перегрузок в цепи солнечных батарей (плавкие предохранители) и защиту от импульсных перенапряжений (surge protection device – SPD), а также содержит устройство ручной коммутации блоков солнечных модулей (рубильники).

Условие выбора номинального напряжения SPD:

$$V_{SPD}^{PV} \geq 1,2V_{oc}N_{ser} \text{ или } V_{SPD}^{PV} = V_{rat.inv}N_{ser},$$

где V_{oc} – напряжение холостого хода PVM, В; $V_{rat.inv}$ – максимальное напряжение на входе инвертора, В; N_{ser} – число последовательно соединенных PVM.

Условие выбора номинального тока предохранителей:

$$I_{fuse}^{PV} = 1,1I_{sc}N_{par} \text{ или } I_{fuse}^{PV} \leq 1,1 \cdot I_{PVmaxSC}N_{par},$$

где I_{sc} – ток короткого замыкания PVM, А; $I_{PVmaxSC}$ – максимальный ток короткого замыкания PVM на входе инвертора, А; N_{par} – число параллельно соединенных PVM.

2. Блок СВ2 содержит аппараты токовой защиты инвертора от коротких замыканий и перенапряжений (автоматические выключатели) со стороны потребителя, а также устройства защиты от импульсных перенапряжений (SPD).

3. Блок СВ3 обеспечивает защиту инвертора от КЗ и перегрузки со стороны блока аккумуляторных батарей (плавкие предохранители), а также содержит устройство коммутации (рубильник) для ручного включения и выключения блока АВ.

4. Блок СВ4 предназначен для обеспечения пуска генератора и токовой защиты. Блок содержит автоматический выключатель и магнитный пускатель (контактор).

Выбор уставок коммутационных и защитных аппаратов, а также сечений проводников производится согласно требованиям соответствующих нормативных документов.

Заключение

Представлены результаты исследований по разработке системы электроснабжения автономного модульного дома. Предложена инженерная методика проектирования таких систем, которая состоит из четырех последовательных этапов. Методика ориентирована на проектирование систем электроснабжения «активных» зданий с максимально возможным использованием возобновляемых источников энергии. На первом этапе проектирования определяются энергетические потребности здания в электрической энергии и доступный энергетический потенциал ВИЭ с суточной дискретизацией по сезонам года. На основе анализа энергетического баланса определяется целесообразность применения того или иного ВИЭ, необходимость использования накопителей энергии и резервных генераторов на органическом топливе.

На втором этапе выбирается тип генерирующего оборудования и разрабатывается структурная схема его сопряжения в составе единой энергетической системы. На третьем этапе осуществляется имитационное моделирование рабочих режимов электроэнергетической системы на годовом временном интервале, по результатам которого определяется окончательный состав и типоразмеры основного электрооборудования. На заключительном этапе проекта производится выбор необходимой коммутационной и защитной аппаратуры, проводников и разрабатываются электрические и монтажные схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Carbon Budget 2021. URL: <https://essd.copernicus.org/articles/14/1917/2022/essd-14-1917-2022.pdf> (дата обращения 22.09.2022).
2. UNFCCC. The Paris Agreement. 2015. URL: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf (дата обращения 22.09.2022).
3. A review on zero energy buildings – Pros and cons / T. Wilberforce, A.G. Olabi, E.T. Sayed, K. Elsaid, H.M. Maghrabi, M.A. Abdelkareem // Energy and Built Environment. – 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.06.002> (дата обращения 22.09.2022).
4. Promoting energy efficiency standards and technologies to enhance energy efficiency in buildings / ECE Energy Series No. 60. – Geneva, 2020.
5. Moghaddasi H., Culp C., Vanegas J. Net zero energy communities: integrated power system, building and transport sectors // Energies. – 2021. – V. 14. – № 21. – 7065. URL: <https://doi.org/10.3390/en14217065> (дата обращения 22.09.2022).
6. Adeli M.M., Farahat S., Sarhaddi F. Optimization of energy consumption in net-zero energy buildings with increasing thermal comfort of occupants // International Journal of Photoenergy. – 2020. – V. 2020. – 9682428. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/9682428> (дата обращения 22.09.2022).
7. Bataineh K., Rabee A.A. A cost effective approach to design of energy efficient residential buildings // Frontiers of Architectural Research. – 2022. – V. 11. – № 2. – P. 297–307. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.10.004> (дата обращения 22.09.2022).
8. Cost-aware design and simulation of electrical energy systems / Y. Chen, S. Vinco, D. Baek, S. Quer, E. Macii, M. Poncino // Energies. – 2020. – V. 13. – № 11. – 2949. URL: <https://doi.org/10.3390/en13112949> (дата обращения 22.09.2022).
9. Hybrid renewable energy applications in zero-energy buildings and communities integrating battery and hydrogen vehicle storage / J. Liu, X. Chen, H. Yang, K. Shan // Applied Energy. – 2021. – V. 290. – 116733. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116733> (дата обращения 22.09.2022).
10. Feasibility study and passive design of nearly zero energy building on rural houses in Xi'an, China / H. Chang, Y. Hou, I. Lee, T. Liu, T.D. Acharya // Buildings. – 2022. – V. 12. – № 3. – 341. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12030341> (дата обращения 22.09.2022).
11. Sobhani H., Shahmoradi F., Sajadi B. Optimization of the renewable energy system for nearly zero energy buildings: a future-oriented approach // Energy Conversion and Management. – 2020. – V. 224. – 113370. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113370> (дата обращения 22.09.2022).
12. Erhorn H., Erhorn-Kluttig H. Selected examples of Nearly ZeroEnergy Buildings Detailed Report. 2014. URL: https://www.epbd-ca.eu/wp-content/uploads/2011/05/CT5_Report_Selected_examples_of_NZEBs-final.pdf (дата обращения 22.09.2022).

13. Data on nearly zero energy buildings (NZEBS) projects and best practices in Europe / D. D'Agostino, S. Tsemekidi Tzeiranaki, P. Zangheri, P. Bertoldi // Data in Brief. – 2021. – V. 39. – 107641. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107641> (дата обращения 22.09.2022).
14. Zero net energy case study homes. V. 1 // Library of Congress Cataloging-in-Publication. – California, 2021.
15. Компания Rocket Group – официальный сайт. URL: <https://rcktpro.com/> (дата обращения 22.09.2022).
16. Обухов С.Г., Ибрагим А. Оптимизация состава оборудования гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20 – № 2. – С. 64–76. URL: <https://vestnik.susu.ru/power/article/view/9923/7828> (дата обращения 22.09.2022).
17. Техническая коллекция от компании Schneider Electric: Выпуск № 11 «Проектирование электроустановок квартир с улучшенной планировкой и коттеджей». – М.: ТЕХСОЛ1, 2007. – 241 с.
18. СП 31-110-2003. Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий // Госстрой России. Свод правил по проектированию и строительству. – М.: Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу (ГОССТРОЙ России), 2004. – 55 с.
19. РД 34.20.178. Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства // Методические указания по расчету электрических нагрузок в сетях 0,38-110 кВ сельскохозяйственного назначения. – М.: Всесоюзный государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Сельэнергопроект», 1985. – 109 с.
20. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Masolov V.G. Mathematical model of solar radiation based on climatological data from NASA SSE // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – V. 363. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/363/1/012021> (дата обращения 22.09.2022).
21. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Kryuchkova M. Simulation of electrical characteristics of a solar panel // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – V. 363. II International Conference «Cognitive Robotics». – Tomsk, 22–25 November 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/132/1/012017
22. Federal Climate Complex Data Documentation for Integrated Surface Data // National Climatic Data Center. URL: <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/isd-format-document.pdf> (дата обращения 22.09.2022).
23. Spera D.A., Richards T.R. Modified power law equations for vertical wind profiles // Proceedings of the Conference and Workshop on Wind Energy Characteristics and Wind Energy Siting. – Portland, Oregon, 19–21 June 1979. – Portland, Oregon: Battelle Memorial Institute, Pacific Northwest Laboratory, 1979. – P. 47–58.
24. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 38–51. URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/41318/1/bulletin_tpu-2017-v328-i6-04.pdf (дата обращения 22.09.2022).
25. Обухов С.Г., Климова Г.Н., Ибрагим А.И. Методика оптимизации состава оборудования электроэнергетических систем на основе возобновляемых источников энергии // Вестник ИГЭУ. – 2020. – № 6. – С. 25–38. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.025-038.

Поступила 23.10.2022 г.
Прошла рецензирование 24.11.2022 г.

Информация об авторах

Обухов С.Г., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Давыдов Д.Ю., кандидат технических наук, ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Белоглазкин А.О., директор по развитию ООО «Рокет групп» Limited Liability Company «ROCKET GROUP».

UDC 621.311.26

ENGINEERING METHODOLOGY FOR DESIGNING POWER-SUPPLY SYSTEMS OF AUTONOMOUS ENERGY EFFICIENT BUILDINGS BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

Sergey G. Obukhov¹,
serob@tpu.ru

Denis Yu. Davydov¹,
denisyudavydov@gmail.com

Alexey O. Beloglazkin²,
rcktgroup@gmail.com

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Rocket Group LLC,
5a, 1st Magistralny tupik, Moscow, 123290, Russia.

Relevance. The construction sector is currently one of the largest consumers of raw materials and a major source of environmental pollution, accounting for about 40 % of energy consumption and about 30 % of greenhouse gas emissions. As a result of emissions into the atmosphere of combustion products of coal, oil and gas, irreparable damage is caused to the environment. One of the promising ways to solve this problem is the introduction of «energy efficient building» technology. The key task of designing energy-efficient buildings is the development of a power supply system, which largely determines the level of comfort and technical and economic indicators of the entire facility. The complexity of this task is caused by the fact that installations based on renewable energy sources, characterized by stochastic generation, are mainly used as power sources, and energy-efficient buildings themselves can differ significantly from each other in a number of parameters: purpose, architecture, size and number of storeys, composition of consumers etc. The article proposes an engineering technique for designing such objects and the results of its testing.

The aim of study is to develop an engineering methodology for designing power supply systems for autonomous energy-efficient buildings based on renewable energy sources.

Methods: methods of statistical processing of time series of data, mathematical and computer modeling using the MatLab/Simulink software environment.

Results. The authors have proposed an engineering methodology for designing power supply systems for autonomous objects, focused on the design of «active» buildings with the maximum possible use of renewable energy sources. The paper describes the main design stages, which include calculation and analysis of the energy balance, choice of the main electrical equipment and development of a structural diagram of the electric power system, optimization of the composition and sizes of the main electrical equipment, selection of switching and protective devices, conductor products, development of circuit diagrams. The paper considers the practical example of application of the proposed methodology for designing the power supply system of an autonomous energy-efficient building in the Kursk region.

Key words:

energy efficient building, renewable energy sources, time series, hybrid power supply systems, energy balance, autonomous power supply system.

REFERENCES

1. *Global Carbon Budget 2021*. Available at: <https://essd.copernicus.org/articles/14/1917/2022/essd-14-1917-2022.pdf> (accessed 22 September 2022).
2. *UNFCCC. The Paris Agreement*. 2015. Available at: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf (accessed 22 September 2022).
3. Wilberforce T., Olabi A.G., Sayed E.T., Elsaid K., Maghrabie H.M., Abdelkareem M.A. A review on zero energy buildings – pros and cons. *Energy and Built Environment*, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.06.002> (accessed 22 September 2022).
4. Promoting energy efficiency standards and technologies to enhance energy efficiency in buildings. *ECE Energy Series*, no. 60, Geneva, 2020.
5. Moghaddasi H., Culp C., Vanegas J. Net zero energy communities: integrated power system, building and transport sectors. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 21, art. no. 7065. Available at: <https://doi.org/10.3390/en14217065> (accessed 22 September 2022).
6. Adeli M.M., Farahat S., Sarhaddi F. Optimization of energy consumption in net-zero energy buildings with increasing thermal comfort of occupants. *International Journal of Photoenergy*, 2020, vol. 2020, art. no. 9682428. Available at: <https://doi.org/10.1155/2020/9682428> (accessed 22 September 2022).
7. Bataineh K., Rabee A.A. A cost effective approach to design of energy efficient residential buildings. *Frontiers of Architectural Research*, 2022, vol. 11, no. 2, pp. 297–307. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.10.004> (accessed 22 September 2022).
8. Chen Y., Vinco S., Baek D., Quer S., Macii E., Poncino M. Cost-aware design and simulation of electrical energy systems. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 11, art. no. 2949. Available at: <https://doi.org/10.3390/en13112949> (accessed 22 September 2022).
9. Liu J., Chen X., Yang H., Shan K. Hybrid renewable energy applications in zero-energy buildings and communities integrating battery and hydrogen vehicle storage. *Applied Energy*, 2021, vol. 290, art. no. 116733. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116733> (accessed 22 September 2022).
10. Chang H., Hou Y., Lee I., Liu T., Acharya T.D. Feasibility study and passive design of nearly zero energy building on rural houses in Xi'an, China. *Buildings*, 2022, vol. 12, no. 3, art. no. 341. Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings12030341> (accessed 22 September 2022).
11. Sobhani H., Shahmoradi F., Sajadi B. Optimization of the renewable energy system for nearly zero energy buildings: a future-oriented approach. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 224, art. no. 113370. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113370> (accessed 22 September 2022).

12. Erhorn H., Erhorn-Kluttig H. *Selected examples of Nearly ZeroEnergy Buildings Detailed Report*. 2014. Available at: https://www.epbd-ca.eu/wp-content/uploads/2011/05/CT5_Report_Selected_examples_of_NZEBs-final.pdf (accessed 22 September 2022).
13. D'Agostino D., Tsemekidi Tzeiranaki S., Zangheri P., Bertoldi P. Data on nearly zero energy buildings (NZEBS) projects and best practices in Europe. *Data in Brief*, 2021, vol. 39, art. no. 107641. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107641> (accessed 22 September 2022).
14. Zero net energy case study homes. Vol. 1. *Library of Congress Cataloging-in-Publication*. California, 2021.
15. *Rocket Group company – official website*. Available at: <https://rcktpro.com/> (accessed 22 September 2022).
16. Obukhov S.G., Ibrahim A. Optimization of equipment composition of hybrid energy systems with renewable energy sources. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 64–76. In Rus. DOI: 10.14529/power200206
17. Tekhnicheskaya kolleksiya ot kompanii Schneider Electric: Vypusk no. 11 «Proektirovanie elektroustanovok kvartir s uluchshennoy planirovkoj i kottedzhey» [Technical collection from Schneider Electric: Issue No. 11 «Design of electrical installations of apartments with improved layout and cottages»]. Moscow, TECHCOL1 Publ., 2007. 241 p.
18. SP 31-110-2003. *Proektirovanie i montazh elektroustanovok zhi-lykh i obshchestvennykh zdaniy. Svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu* [Design and installation of electrical installations for residential and public buildings. Design and construction instructions]. Moscow, Gosstroy Rossii Publ., 2004. 55 p.
19. RD 34.20.178. *Rukovodyashchie materialy po proektirovaniyu el-ektrosnabzheniya selskogo khozyaystva. Metodicheskie ukazaniya po raschetu elektricheskikh nagruzok v setyakh 0,38–110 kV selskokhozyaystvennogo naznacheniya* [Guiding materials 34.20.178 Guidelines for the design of agricultural power supply. Guidelines for the calculation of electrical loads in networks of 0,38–110 kV for agricultural purposes]. Moscow, All-Union State Design and Survey and Research Institute «Senergoeroekt» Publ., 1985. 109 p.
20. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Masolov V.G. Mathematical model of solar radiation based on climatological data from NASA SSE. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 363. II International Conference «Cognitive Robotics», Tomsk, 22–25 November 2017. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/363/1/012021> (accessed 22 September 2022).
21. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Kryuchkova M. Simulation of electrical characteristics of a solar panel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 363. II International Conference «Cognitive Robotics». Tomsk, 22–25 November 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/363/1/012017
22. Federal climate complex data documentation for integrated surface data. *National Climatic Data Center*. Available at: <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/isd-format-document.pdf> (accessed 22 September 2022).
23. Spera D.A., Richards T.R. Modified power law equations for vertical wind profiles. *Proceedings of the Conference and Workshop on Wind Energy Characteristics and Wind Energy Siting*. Portland, Oregon, 19–21 June 1979. Portland, Oregon, Battelle Memorial Institute, Pacific Northwest Laboratory, 1979. pp. 47–58.
24. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Simulation model of operation of autonomous photovoltaic plant under actual operating conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 38–51. In Rus. Available at: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/41318/1/bulletin_tpu-2017-v328-i6-04.pdf (accessed 22 September 2022).
25. Obukhov S.G., Klimova G.N., Ibrahim A. Methodology of optimum unit commitment of energy systems with renewable energy sources. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2020, no. 6, pp. 25–38. In Rus. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.025-038.

Received: 23 October 2022.

Reviewed: 24 November 2022.

Information about the authors

Sergey G. Obukhov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Denis Yu. Davydov, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexey O. Beloglazkin, development director, Rocket Group LLC.

УДК 622.24.06

АНАЛИЗ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ПАЧЕК В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ СКВАЖИН

Королев Алексей Сергеевич¹,
korolev2818@gmail.com

Минаев Константин Мадестович¹,
minaevkm@tpu.ru

Сагитов Рашид Равильевич¹,
Sagitov_r@bk.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. В процессе бурения скважин часто прибегают к использованию различных пачек, выполняющих самые разные функции, такие как предотвращение контакта различных жидкостей в скважине, очистка ствола скважины, снижение сил трения, ликвидация осложнений. При этом в большинстве случаев используется преимущественно только один способ применения таких жидкостей – заблаговременное приготовление пачек в отдельных емкостях с последующей прокачкой в скважине. Данный способ отличается низкой технологичностью, привлечением дополнительного парка емкостей и повышенным расходом реагентов. С учетом широкой распространенности технологии прокачки пачек в процессе бурения даже незначительная оптимизация позволит сократить расходы на проведение этих операций. Слабая публикационная активность по этой теме дополнительно обуславливает необходимость более активного изучения и освещения в научной и обзорной литературе традиционных и альтернативных технологий приготовления и использования пачек в бурении скважин.

Цель: рассмотреть технологию использования шашек для приготовления пачек при бурении скважин, выделить область применения и ограничения данной технологии.

Объекты: шашки для приготовления пачек в процессе бурения скважин.

Методы: анализ разновидностей пачек, используемых при бурении скважин, для выделения требований к их применению и приготовлению, анализ и оценка традиционной технологии приготовления пачек, анализ и оценка технологии использования шашек для приготовления пачек.

Результаты. Авторами выделены основные разновидности пачек, применяемых при бурении скважин, преимущества и недостатки технологии использования шашек для приготовления пачек, а также области применения согласно обнаруженным ограничениям.

Ключевые слова:

буровой раствор, очистка скважины, буферная пачка, кольматирующая пачка, пачка с повышенным содержанием смазывающей добавки, пачка для очистки ствола скважины, пачка с волокнистым кольматантом, шашка.

Введение

Падение добычи нефти из-за истощения запасов на разрабатываемых месторождениях вынуждает недропользователей расширять территориальные границы своей деятельности. Привычные методы строительства скважин не могут быть применимы для любых геологических условий, в результате чего подрядчики могут столкнуться с разного рода трудностями. В результате формируется новый виток технологий, призванный решить имеющиеся проблемы и предотвратить возможные в будущем.

Так, при бурении зачастую возникают проблемные ситуации, которые невозможно эффективно решать с применением только бурового раствора. К ним относятся сложности в ориентировании инструмента при бурении в режиме слайдирования, подвешивание инструмента, недохождение нагрузки на долото, высокие значения крутящего момента и нагрузок на крюке, подлипание инструмента [1], неудовлетворительная очистка ствола скважины и т. д. [2]. Кроме того, при строительстве скважин не исключено возникновение

осложнений, связанных с поглощением бурового раствора, неустойчивостью стенок скважины, образованием сальников на инструменте и т. д.

Для решения подобных проблем прибегают к использованию специализированных пачек (англ. «pill»). Пачка – это относительно небольшой объем жидкости, который закачивается в скважину для выполнения технологических функций, которые не способен обеспечить используемый в текущий момент буровой раствор. С одной стороны, пачка может быть схожа с используемым буровым раствором с минимальными отличиями в технологических параметрах, например, могут различаться только вязкость или плотность. С другой стороны, пачка может иметь не только кардинально отличные технологические параметры, но и иметь в своей основе другой тип жидкости, например, углеводородную основу.

Выбор той или иной рецептуры пачки зависит от выполняемых задач. В процессе строительства одной скважины в программу промывки может быть заложено несколько рецептур пачек. Для выбора одной рецептуры из многих формируются алгоритмы, опре-

деляющие наиболее подходящую с учетом фактических данных. В целом, несмотря на широкое использование технологии прокачки пачек, исследователи отмечают малое количество упоминаний этой темы в научной литературе [3].

С учетом распространенности технологии использования пачек актуальным является вопрос оптимизации их приготовления и применения.

Разновидности пачек

На рис. 1 представлены основные разновидности пачек, применяемых при бурении скважин.

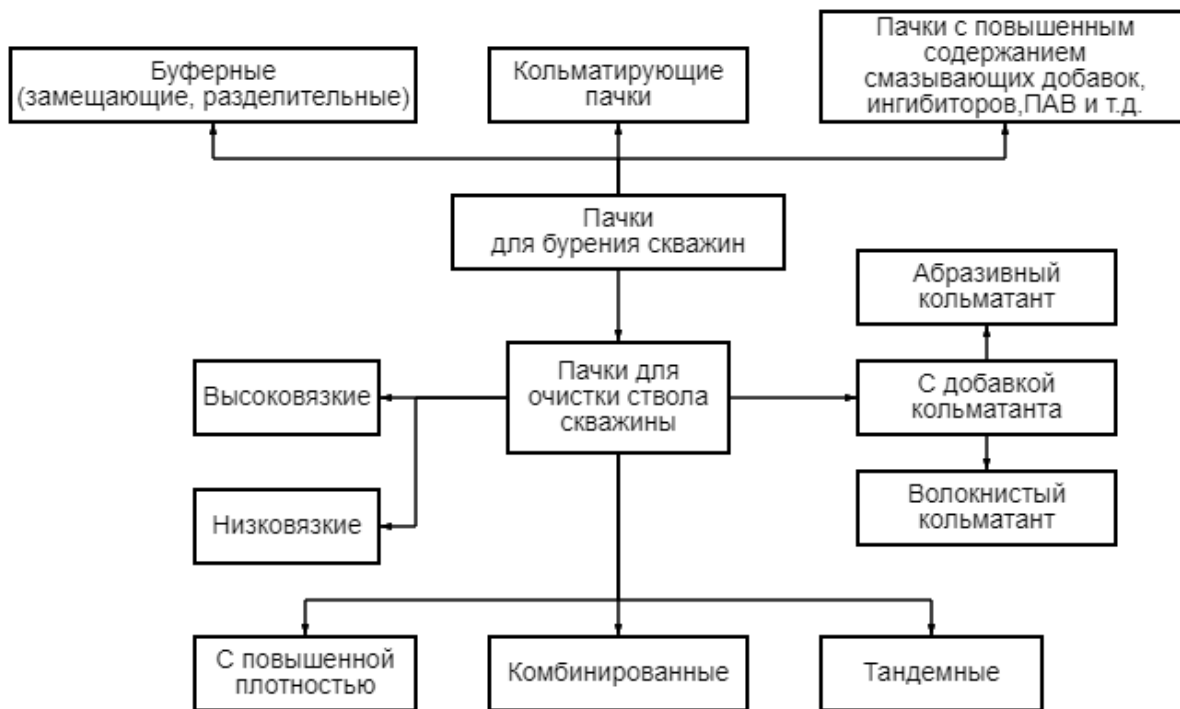


Рис. 1. Классификация пачек

Fig. 1. Pill classification

Пачки в зависимости от состава могут выполнять следующие функции:

- отделение систем буровых растворов друг от друга при замещении в скважине;
- изоляция интервалов ствола скважины от влияния других технологических жидкостей;
- удержание другой пачки в стволе скважины, предохранение ее от контакта с другими жидкостями;
- очистка ствола скважины;
- закупоривание каналов поглощения;
- снижение сил трения;
- удаление сальников с бурильного инструмента и т. д.

В случаях, когда перевод скважины на другую технологическую жидкость предполагает недопустимость смешения этих жидкостей, могут применяться буферные (замещающие, разделительные) пачки. Применение этих пачек наиболее оправданно при переводе скважины с раствора на водной основе (РВО) на раствор на углеводородной основе (РУО) и наоборот. Смешение в скважине РВО и РУО приведет к значительному изменению технологических свойств обеих жидкостей, что недопустимо с учетом как высокой стоимости самих компонентов, так и значительных затрат на утилизацию некондиционных жидкостей. Кроме того, буферные пачки обеспечивают

более качественное замещение жидкостей за счет вовлечения застойных зон [4].

Изоляция буровых растворов друг от друга достигается путем закачки в скважину буферных пачек, которые могут быть как на водной, так и на углеводородной основе, в зависимости от того, какой буровой раствор изначально находился в скважине. В случае замещения РВО на РУО в качестве буферных пачек может использоваться вода или последовательно закаченные вода и загущенный углеводород. При замещении РУО на РВО буферными жидкостями может выступать углеводород или последовательно закаченные углеводороды и загущенная вода (загущенный буровой раствор на водной основе) [5]. Например, при переводе скважины на РУО первый компонент буферной пачки – разделитель на водной основе – может содержать извесь и ксантановый биополимер для достижения условной вязкости 80–100 с. Второй компонент буферной пачки – углеводородный буфер – может быть представлен жидкостью-основой РУО, дизельным топливом или газовым конденсатом [6].

При наличии в разрезе скважины интервалов с вероятностью возникновения поглощений в программу промывки скважины закладывается рецептура и алгоритм приготовления кольматирующих пачек. Такие пачки характеризуются высокими концентрациями

наполнителей (твердой фазы) и относительно широким спектром технологий их применения. Например, эффект от кольматирующей пачки может достигаться при помощи прокачки по циклу некоторого заданного объема бурового раствора с повышенным содержанием кольматанта; размещения кольматирующей пачки напротив интервала поглощения с последующей задавкой в пласт или без нее. Концентрации наполнителей в кольматационных пачках варьируются в широких пределах – от 40 до 200 кг/м³ – и зависят как от геологических условий – геометрические размеры трещин каналов поглощения, так и от используемой технологии применения пачки – прокачка через все элементы КНБК или с использованием циркуляционного переводника [7].

При бурении скважин большого диаметра, скважин со сложным профилем, большими величинами отхода от вертикали могут возникать проблемы неудовлетворительной очистки ствола скважины. В таком случае в зависимости от обстоятельств может применяться широкий спектр очищающих пачек. Выделяют следующие виды таких пачек:

- высоковязкие;
- низковязкие;
- с повышенной плотностью;
- комбинированные;
- тандемные;
- с добавкой кольматанта.

Основной отличительной чертой очищающих пачек является их реологическая характеристика, описываемая в основном такими параметрами, как пластическая вязкость (ПВ), динамическое напряжение сдвига (ДНС) и статическое напряжение сдвига (СНС) [8].

Каждая из этих перечисленных пачек имеет свою область применения, где она проявляет наибольшую эффективность. Так, высоковязкие пачки наиболее предпочтительно применять в интервалах скважины с невысокими значениями зенитного угла, обычно до 30°. Высоковязкие пачки характеризуются невысокими значениями ПВ, увеличенными значениями ДНС и СНС. В качестве контролируемого параметра часто выбирается условная вязкость, принимаемая в среднем в диапазоне от 80 до 140 с. За счет таких характеристик достигается высокая выносящая способность, обусловленная ламинарным течением пачки в затрубном пространстве. Наличие вращения буровой колонны в процессе прокачки пачки вызывает турбулизацию потока, поэтому прокачка таких пачек ведется преимущественно при отсутствии или низкой частоте вращения буровой колонны [9].

Низковязкие пачки, напротив, имеют повышенную эффективность при их использовании в наклонно-направленных скважинах с зенитным углом более 30°. Проблема неудовлетворительной очистки может быть вызвана не столько недостаточной выносящей способностью бурового раствора, сколько наличием шламовой подушки на стенке скважины, формирующейся при зенитных углах от 30 до 60° [5]. Эксцентриситет буровой колонны также негативно сказывается на

очистке, поскольку приводит к перераспределению скоростей восходящего потока бурового раствора в сечении ствола скважины. Наиболее критичная ситуация возникает, когда буровая колонна лежит на нижней образующей стенки скважины, что усугубляет формирование шламовой подушки за счет уменьшения скорости восходящего потока в этой зоне. Удаление шлама низковязкой пачкой достигается путем формирования турбулентного потока, который способствует эрозии шламовой подушки и поднимает шлам из зоны низких скоростей восходящего потока в зону наибольших скоростей. Отсюда следует, что в случае использования высоковязких пачек в скважинах с большими зенитными углами очистка не будет достигаться, так как не будет формироваться турбулентного потока. Кроме того, высоковязкая пачка будет иметь тенденцию перемещаться в области наибольших скоростей восходящего потока, не затрагивая шламовую подушку.

Пачки с повышенной плотностью используются так же, как и низковязкие, в наклонно-направленных скважинах с большим зенитным углом и горизонтальных скважинах. Эти пачки реализуют несколько иной подход при очистке ствола скважины. Основным механизмом воздействия на частицы шлама – сила Архимеда, которая позволяет шламовой подушке разрушаться при приложении меньших усилий даже без значительной турбулизации потока. За счет разности плотностей бурового раствора и пачки с повышенной плотностью последняя будет перемещаться преимущественно по нижней образующей стенки скважины, где находится шламовая подушка. Препятствием к применению таких пачек могут выступать ограничения по величине забойного давления для предотвращения поглощений. Согласно накопленным сведениям [5], для создания значимого эффекта различие плотностей пачки с повышенной плотностью и исходного бурового раствора должно составлять не менее 0,1 кг/л. На основании этих рекомендаций можно провести оценочный расчет необходимого количества утяжелителя: для увеличения плотности бурового раствора от 1,1 до 1,2 кг/л с использованием барита необходимо довести концентрацию утяжелителя минимум до 140 кг/м³, в зависимости от влажности.

К комбинированным пачкам относятся высоковязкие и низковязкие пачки с повышенной плотностью. Каждая из этих пачек обладает своими преимуществами и областями применения. Так, низковязкая пачка с повышенной плотностью, обладая преимуществами пачки с повышенной плотностью, такими как повышенная выталкивающая сила и тенденция двигаться в области шламовой подушки, обеспечивает дополнительную турбулизацию потока, которая приводит к более существенному разрушению шламовой подушки. Высоковязкая пачка с повышенной плотностью обладает более высокой транспортирующей способностью, что может быть использовано при значительном количестве скопившегося шлама в скважинах с невысокими значениями зенитного угла [8].

Под tandemными пачками подразумевают последовательную закачку пачек с различными характеристиками, например, производится закачка низковязкой пачки, следом за которой закачивается высоковязкая пачка. Данная комбинация с помощью низковязкой пачки обеспечивает предварительную турбулизацию потока, разрушение шламовой подушки и поднятие частиц шлама в область наибольших скоростей восходящего потока. Затем высоковязкая пачка, обладая более высокой выносящей способностью, обеспечивает перемещение и вынос взвешенных частиц шлама. Аналогичный эффект может быть достигнут при последовательной закачке низковязкой пачки и пачки с повышенной плотностью [10].

Каждая из вышеперечисленных пачек может быть дополнительно обработана кольматантом, который в зависимости от разновидности может оказывать различный эффект. К реагентам, увеличивающим несущую способность жидкости, относятся кольматирующие материалы волокнистой структуры, называемые «sweeping agents». Добавление волокнистого материала в пачку значительно увеличивает транспортирующую способность без существенного увеличения вязкости самой пачки [11]. Волокнистые наполнители способствуют удалению из скважины наиболее крупных частиц шлама, а мелкие частицы – основная составляющая шламовой подушки – остаются преимущественно нетронутыми. Для решения этой проблемы могут быть использованы абразивные кольматанты, например, ореховая скорлупа. При прокачивании таких пачек шламовая подушка разрушается за счет абразивного воздействия, а наличие турбулентного потока только усиливает эффект [12].

Кроме вышеперечисленных могут также использоваться в зависимости от потребностей смазывающие пачки, пачки с повышенным содержанием детергентов, гидрофобизаторов, других поверхностно-активных веществ (ПАВ), ингибиторов и т. д. Так, смазывающие пачки применяются при бурении наклонно-направленных скважин, для облегчения ориентирования инструмента на забое при бурении в режиме слайдирования, для снижения величины крутящего момента в целом, для облегчения спуска обсадных колонн. Также смазывающие пачки могут прокачиваться при возникновении подлипания инструмента. Концентрация смазывающей добавки в пачке может достигать 5–10 %. Зачастую предполагается приготовление комбинированной пачки, например, высоковязкой или кольматационной с повышенным содержанием смазочной добавки [13]. Пачки с повышенным содержанием гидрофобизаторов и детергентов могут прокачиваться для профилактики сальникообразования при бурении интервалов активных глин. Содержание активных веществ в этих пачках может достигать 3 кг/м^3 .

Таким образом, среди перечисленных пачек можно выделить две группы по концентрации действующего вещества. К пачкам с высокой концентрацией (более 40 кг/м^3) будут относиться кольматационные пачки и пачки с повышенной плотностью (в т. ч. комбинированные с повышенной плотностью), а к пач-

кам с низкой концентрацией (менее 40 кг/м^3) – все остальные.

Приготовление и применение пачек

Пачки могут готовиться на основе используемого бурового раствора, требуемый объем которого отсекается в отдельной емкости для обработки, либо на основе свежеприготовленного раствора, когда, например, необходимо обеспечить минимальное количество твердой фазы в пачке или получить реологические свойства, значительно отличающиеся от таковых в используемом буровом растворе.

Для изменения реологических характеристик пачек на основе используемого бурового раствора прибегают к химической или физико-химической обработке. Увеличение вязкости достигается путем добавления полимеров в используемый буровой раствор, а разжижение может быть достигнуто разбавлением, например, водой, или химической обработкой. Пример использования полимер-глинистого бурового раствора (плотность $1,16 \text{ г/см}^3$, условная вязкость 45–50 с) в качестве основы для приготовления tandemной пачки:

- низковязкая пачка (объем 5 м^3 , плотность $1,16 \text{ г/см}^3$, условная вязкость 35–40 с): SAPP – 2 кг/м^3 , Праестол 2540 – $3\text{--}4 \text{ кг/м}^3$;
- высоковязкая пачка (объем 8 м^3 , плотность $1,16 \text{ г/см}^3$, условная вязкость 120–150 с): ПАЦ-В – 4 кг/м^3 .

После приготовления пачка продолжает находиться в емкости до момента ее закачки в скважину. В обозначенный момент времени пачка подается насосами из емкости в скважину. Схематическое изображение процесса прокачки высоковязкой пачки с целью очистки скважины приведено на рис. 2.

К минусам данного способа приготовления можно отнести требование наличия на буровой отдельной емкости, необходимость задействования персонала буровой установки, а также затраты времени, не позволяющие максимально оперативно произвести прокачку требуемой пачки. К преимуществам относится максимальный контроль за процессом приготовления, контроль качества полученной пачки.

Известен способ приготовления пачек непосредственно в бурильной колонне [14]. Для реализации используется специальный контейнер, способный хранить действующее вещество пачки и выпускать его при контакте с жидкостью. Данные контейнеры сбрасываются в бурильную колонну при наращивании в количестве, требуемом для приготовления необходимого объема пачки с заданной концентрацией действующего вещества. После завершения наращивания и запуска циркуляции контейнер под воздействием жидкости разрушается, а его содержимое распределяется в турбулентном потоке внутри бурильной колонны. Таким образом непосредственно в бурильной колонне формируется пачка.

Зарубежные производители используют термин «stick» для обозначения контейнера, содержащего реагент и предназначенного для подачи в скважину в процессе ее бурения или эксплуатации [15]. В рос-

сийской литературе известен термин «шашка», используемый при реализации адресной доставки реагента и обозначающий технологию, подразумевающую подачу контейнера с реагентом в скважину, находящуюся в эксплуатации [16]. С учетом уже существующей терминологии для обозначения техно-

логии доставки контейнера с реагентом в скважину в процессе бурения далее будет использоваться термин «шашка».

Схематическое изображение процесса прокачки высоковязкой пачки с использованием шашек приведено на рис. 3.

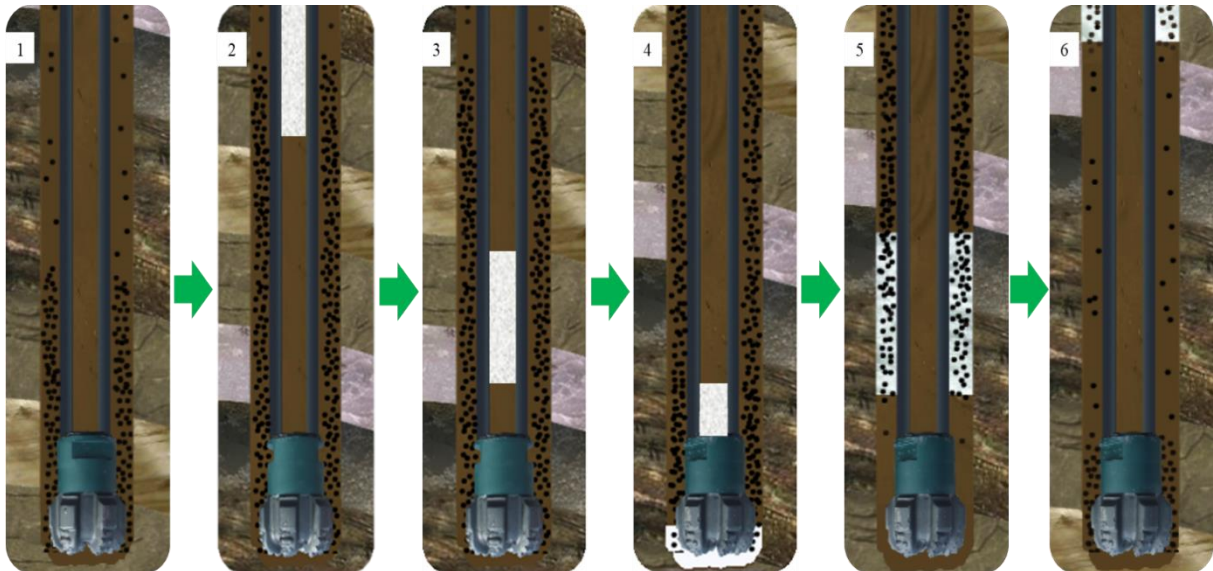


Рис. 2. Порядок прокачки высоковязкой пачки: 1) состояние скважины до прокачки пачки; 2, 3) пачка насосами подается в бурильную колонну и движется в сторону забоя; 4) пачка выходит в затрубное пространство и увлекает частицы шлама; 5, 6) пачка с частицами шлама движется к устью скважины по затрубному пространству

Fig. 2. Procedure of Hi-Vis pill pumping: 1) state of the well before pill pumping; 2, 3) the pill is fed into the drill string by pumps and moves towards the bottomhole; 4) the pill enters the annulus and entrains cuttings; 5, 6) the pill with cuttings moves to the wellhead along the annulus

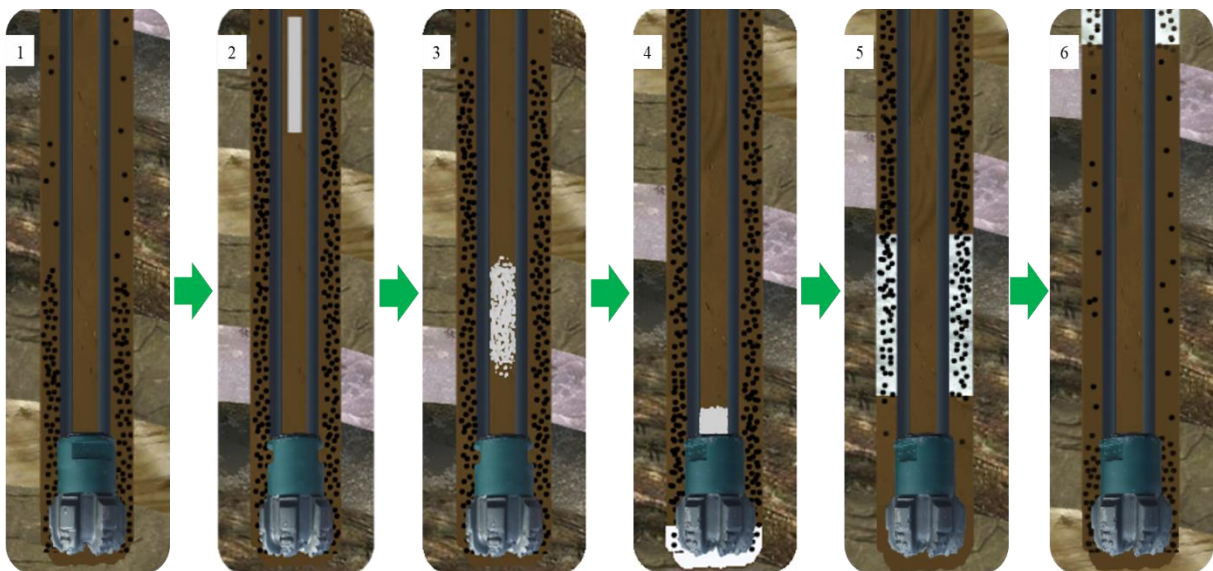


Рис. 3. Порядок формирования высоковязкой пачки при использовании шашки: 1) состояние скважины до прокачки пачки; 2) шашка подается в бурильную колонну; 3) оболочка шашки разрушается, содержимое шашки смешивается с буровым раствором и формирует пачку внутри бурильной колонны; 4) сформированная пачка выходит в затрубное пространство и увлекает частицы шлама; 5, 6) пачка с частицами шлама движется к устью скважины по затрубному пространству

Fig. 3. Procedure of Hi-Vis pill formation using a stick: 1) state of the well before pill pumping; 2) a stick is inserted into the drill string; 3) a stick shell is destroyed, stick content mixes with the drilling fluid and forms a pill inside the drill string; 4) completed pill goes into the annulus and entrains cuttings; 5, 6) a pack of cuttings particles moves to the wellhead along the annulus

Наибольшее распространение за рубежом получили шашки, содержащие:

- смазывающие добавки [17, 18];
- акриловые сополимеры (наиболее распространен частично гидролизованный полиакриламид (ЧПЛАА) [19, 20];
- ПАВ (наиболее распространен SAPP) [21, 22].

На российском рынке шашки представлены достаточно узким ассортиментом. Так, компания ООО «НЭСТ», реализующая продукцию компании M-I Swaco, имеет в своем ассортименте шашки для формирования в буровой колонне пачки на основе вязкоупругого состава (ВУС) для буровых растворов как на водной, так и на углеводородной основе [23].

В настоящее время разработкой технологий адресной доставки химических реагентов занимаются со-

трудники Томского политехнического университета, совместно с малым инновационным предприятием ООО НПО «ХОС» [24]. На данный момент производятся различные варианты шашек для применения в эксплуатируемых скважинах, а также проводятся испытания шашек для применения в процессе бурения скважин. Пример изготавливаемой продукции представлен на рис. 4. Содержимое шашки и оболочка могут быть подобраны под предполагаемые условия применения по согласованию с заказчиком. Возможно изготовление шашек как с быстрорастворимой оболочкой для наиболее быстрого высвобождения содержимого, так и с оболочкой, обеспечивающей определенную временную задержку.

Схема водорастворимой шашки производства ООО НПО «ХОС» в разрезе представлена на рис. 5.



Рис. 4. Пример продукции компании ООО Научно-производственное объединение «ХОС»

Fig. 4. LLC Scientific and production Association «OCC» product example

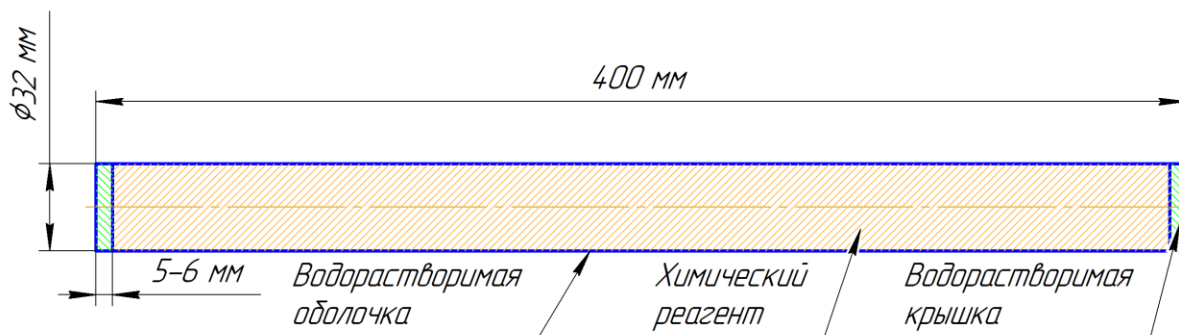


Рис. 5. Схема водорастворимой шашки в разрезе

Fig. 5. Sectional diagram of a water-soluble stick

Из проведенного анализа разновидностей шашек видно, что они предназначены для формирования пачек с низкой концентрацией действующего вещества, т. е. коалмацационные пачки и пачки с повышенной плотностью не реализуются таким способом приготовления.

К преимуществам использования шашек при бурении можно отнести:

- отсутствие необходимости использования специальной техники и персонала буровой бригады для приготовления пачки;
- простота операции сбрасывания шашек в скважину, которая проводится вручную в процессе наращивания буровой колонны;
- получение необходимой концентрации реагента в пачке путем варьирования количества сбрасываемых шашек и интервалов времени между сбрасываниями;
- простота и удобство транспортировки.

Шашки не призваны заменить традиционные технологии приготовления и прокачки пачек, они выступают дополнительным инструментом при строительстве скважин. Имеющиеся данные позволяют заключить, что шашки способны обеспечить эффективность, сопоставимую с прокачкой традиционных пачек [25].

Для реализации технологии использования шашек в процессе бурения должны быть соблюдены следующие требования:

- контейнер для хранения действующего реагента (оболочка шашки) должен быть полностью водорастворим;
- время разрушения контейнера для хранения действующего реагента (оболочки шашки) при контакте с жидкостью должно быть минимальным или специально подобранным под условия применения;
- действующий реагент (содержимое шашки) должен полностью диспергироваться в жидкости без образования агломератов;
- действующий реагент (содержимое шашки) должен иметь высокую скорость растворения в жидкости, кроме случаев, когда используемый реагент представлен нерастворимым в данной жидкости веществом;
- размеры шашки должны быть подобраны таким образом, чтобы не создавалось препятствий для циркуляции жидкости.

Кроме того, ограничением возможности использования шашек с тем или иным наполнителем является время, необходимое для полного формирования пачки с момента погружения шашки в жидкость. Поскольку пачка формируется при движении внутри буровой колонны, необходимо оценить время, за которое буровой раствор достигнет КНБК. Такое ограничение вызвано необходимостью предотвратить возможное негативное влияние нерастворенных компонентов шашки на чувствительные элементы КНБК, как, например, телесистемы. В качестве примера рассмотрим следующие условия: расход бурового рас-

твора 38 л/с, длина буровой колонны 1475 м, буровой инструмент 127 мм, толщина стенки 9,19 мм. В этом случае пачка достигнет КНБК за 6 минут, что и будет являться предельным временем формирования пачки, т. е. за это время оболочка шашки должна разрушиться и полностью высвободить содержимое, а содержимое в свою очередь должно полностью раствориться или диспергироваться.

Также стоит отметить, что скорость и качество формирования пачки будет зависеть от режима течения потока жидкости в буровой колонне, который является функцией расхода жидкости, ее реологических свойств, плотности, а также геометрических размеров буровой трубы. Очевидно, что при турбулентном режиме течения жидкости будет наблюдаться более интенсивный массообмен при растворении оболочки и содержимого шашки, что приведет к более равномерному распределению реагента по поперечному сечению буровой колонны и более быстрому формированию пачки.

Оценка эффективности применения различных пачек для очистки ствола скважины обычно проводится путем непосредственного наблюдения шлама, попадающего на вибросита. Подтверждение эффективности работы пачки обычно заключается в визуальном увеличении количества шлама на ситах, однако такой подход имеет недостатки. В случае, когда после прокачки пачки на ситах не наблюдается дополнительный вынос шлама, может быть сделан ошибочный вывод, что ствол скважины чистый [26]. Такой результат чаще всего вызван неправильным подбором типа пачки, ее технологических параметров, объема и технологии прокачки. Для оптимизации подбора и технологии прокачки пачек могут быть использованы различные подходы, такие как сбор данных от специализированных датчиков непосредственно в процессе бурения [27, 28], физическое моделирование в лабораторных условиях [3, 8]. Для проведения исследования прокачки пачек с помощью шашек наиболее подходящим методом будет сбор данных непосредственно в процессе бурения, поскольку воспроизвести условия нахождения шашки в буровой колонне в лабораторных условиях представляется весьма трудоемкой задачей, которая не гарантирует получения правдоподобного результата. Таким образом, решение о возможности применения шашки должно приниматься исходя из опыта или экспертного заключения соответствующего специалиста.

Наибольшую сложность для применения в шашках представляют полимерные реагенты. Это обусловлено способностью частиц полимерных реагентов гидратироваться с образованием агломератов, также известных как «рыбий глаз». Эти агломераты характеризуются высокой прочностью гидратной оболочки, которая удерживает частицы вместе, несмотря на значительную скорость сдвига в жидкости. Также наличие гидратной оболочки значительно замедляет последующую гидратацию частиц полимера, и в случае с формированием агломератов те частицы, которые оказались заключены внутри, могут быть вовсе не гидратированы. Для нивелирования этой проблемы полимер, требуемый для использования в

шашках, должен быть переведен в легко диспергируемую форму [29, 30].

Отдельную сложность представляет собой оценка объема пачки, полученной в результате использования шашек. Предположим, что концентрация действующего вещества в пачках для достижения требуемого эффекта должна быть сопоставима, независимо от способа и места их затворения. В зависимости от типа реагента масса одной шашки может находиться в диапазоне 500–700 г. Согласно рекомендациям производителей, на одно наращивание необходимо использовать шашки в количестве как минимум 1 шт. [19], более предпочтительно 2–3 шт. [20]. Для примера рассмотрим прокачку вязко-

упругих составов, в которых концентрация дополнительно вводимого полимера составляет в среднем 4 кг/м³. В случае подачи в бурильную колонну шашек с полимером в количестве 2 шт. допустимо предположить формирование пачки объемом 0,25–0,35 м³.

В программах промывки скважин на нефть и газ средний объем ВУС составляет 8–10 м³. При этом прокачка таких пачек рекомендуется через каждые 150–200 м проходки [28].

Исходя из предположения сопоставимой эффективности технологий закачки традиционных пачек и использования шашек [25], можно сопоставить требуемый расход реагентов (таблица).

Таблица. Расход реагента при использовании традиционной технологии прокачки пачек и технологии использования шашек

Table. Reagent consumption for traditional pill pumping and stick usage

Параметр/технология Parameter/technology	Традиционная прокачка пачек Traditional pill pumping	Прокачка пачек при помощи шашек Pill pumping using sticks
Интервал бурения, м Drilling interval, m	200	
Число наращиваний (при длине свечи 18,5 м) Number of connections for drilling interval (drillpipe stand 18,5 m)	10	
Порядок применения Implementation procedure	Единовременная закачка пачки объемом 8 м ³ One-time pumping of a pill of 8 m ³	Сброс в бурильную колонну 2 шт. шашек при наращивании, итого 20 шт. шашек Inserting into a drill string 2 pcs. sticks while making a connection, total 20 pcs. sticks
Затрачиваемое количество реагентов, кг Consumed amount of reagents, kg	32	10–14 (в зависимости от массы шашки/ depending on stick weight)
Удельный расход реагентов на метр бурения, кг/м Specific consumption of reagents per meter of drilling, kg/m	0,16	0,05–0,07

Заключение

Пачки, как технологические жидкости, используемые при бурении скважин, имеют сравнительно слабую изученность, которая проявляется в небольшом количестве посвященных им публикаций.

Для приготовления пачек может быть использована технология шашек, которая позволяет затворять многие рецептуры пачек прямо в бурильной колонне, за исключением пачек, содержащих повышенное количество вносимых компонентов – от 40 кг/м³, и пачек, применение которых подразумевает установку точного объема жидкости в заданном интервале. Таким образом, согласно выделенной классификации, наиболее подходящие области применения шашек – пачки для очистки ствола скважины и пачки с повышенным содержанием смазывающих добавок, ингибиторов, ПАВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокин С.А., Спиридонов П.Ю. Исследование влияния концентрации смазывающей добавки в рецептуре бурового раствора на коэффициенты трения // Ашировские чтения. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2018. – С. 88–97.
2. Rad M.S.K., Mohammadi M.K., Nowtarki K.T. Investigating hole-cleaning fibers' mechanism to improve carrying cutting capacity and comparing their effectiveness with common polymeric pills // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. – Abu Dhabi, UAE, November 9–12, 2020. – 10 p.
3. Experimental study of effective hole cleaning using «sweeps» in horizontal wellbores / S.G. Valluri, S.Z. Miska, M. Yu, R.M. Ahmed, N. Takach // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – San Antonio, Texas, USA, September 24–27, 2006. – 13 p.

Технология шашек отличается не только большим удобством применения, но и экономической целесообразностью, проявляющейся в меньшей потребности в реагентах на метр бурения, позволяя использовать на 40–70 % меньше реагентов для приготовления пачек.

К недостаткам технологии шашек относятся: слабый контроль объемов получаемых пачек; слабый контроль концентрации действующего вещества в получаемой пачке; зависимость качества затворения пачки от режима течения бурового раствора в бурильных трубах; возможность получения пачки только на основе циркулирующего бурового раствора.

Шашки не могут полностью заменить традиционную технологию приготовления и использования пачек и должны рассматриваться как ситуативная альтернатива.

4. Heavy-duty cleanup: caesium formate-based microemulsions make light work of a tough job / L.P. Moroni, M. Davidson, J. Lam, A. Goonoo, J. Twycross, S.K. Howard // Offshore Technology Conference Asia. – Kuala Lumpur, Malaysia, March 22–25, 2016. – 11 p.
5. Mi Swaco. Руководство по буровым растворам для инженеров-технологов. Редакция 2.1. – М.: Mi Swaco, 2009. – 1000 с.
6. Программа приготовления бурового раствора для резки бокового ствола в скважине № 1273 Уренгойского месторождения / Е.А. Холопов, С.И. Шиян, С.В. Мусийченко, Н.С. Моргунов // Наука. Техника. Технологии (Политехнический вестник). – 2020. – № 2. – С. 267–278.
7. Доброчасов А.И., Попова Ж.С., Саломатов В.А. Технические решения по повышению эффективности бурения боковых горизонтальных стволов на месторождениях

- Западной Сибири // Булатовские чтения. – 2017. – Т. 3. – С. 76–82.
8. Hole cleaning efficiency of sweeping pills in horizontal wells – facts or philosophy? / O. Czuprat, A.M. Faugstad, P. Byrski, K. Schulze // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Denver, Colorado, USA, October 21, 2020. – 28 p.
 9. Hemphill T. A comparison of high-viscosity and high- sweeps as hole cleaning tools: Separating fact from fiction // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Florence, Italy, September 19–22, 2010. – 8 p.
 10. Exceeding technical limit for drilling and completing complex wells by using an optimized flat-rheology mud formulation: a comprehensive overview / A.A. Alomair, H.F. Cuellar, M. Kashwaa, S. Sharma // SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition. – Abu Dhabi, UAE, May 25–27, 2021. – 12 p.
 11. Горпинченко В.А., Дильмиев М.Р. Применение синтетического полимерного волокна для увеличения эффективности выноса шлама при бурении долотами PDC // Бурение & Нефть. – 2010. – № 6. – С. 6–8.
 12. Bulgachev R.V., Pouget P. New experience in monofilament fiber tandem sweeps hole cleaning performance on Kharyaga oilfield, Timan-Pechora Region of Russia // SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. – Moscow, Russia, October 3–6, 2006. – 12 p.
 13. Корунов И.Д., Пономарёв С.А. Регулирование параметров бурового раствора для снижения риска прихвата на месторождениях Балыкской группы // Молодой ученый. – 2020. – № 6 (296). – С. 78–80.
 14. Product and method for treating well bores: patent 6655475 B1 USA. Fil. 11.09.2001; Publ. 12.02.2002.
 15. Rapid sweep. Water-soluble polymer stick // Schlumberger. 2017. URL: <https://www.slb.com/drilling/drilling-fluids-and-well-cementing/drilling-fluids/drilling-fluid-additives/viscosifiers/rapid-sweep-water-soluble-polymer-stick> (дата обращения: 28.09.2022).
 16. Способ удаления жидкости из газовых и газоконденсатных скважин: пат. Рос. Федерация, № 2317412, заявл. 05.10.2016; опубл. 30.01.2018. Бюл. № 4. – 8 с.
 17. Drill Bit Stick // Select Industries. 2022. URL: <https://selectindustries.com/wp-content/uploads/2021/12/Drill-Bit-Stick.pdf> (дата обращения 29.09.2022).
 18. HHL – Horizontal Hole Lubricants // Hydro Foam Technology. 2022. URL: <https://www.hydrofoamtechnology.com/products/hhl-horizontal-hole-lubricants> (дата обращения 29.09.2022).
 19. Product Sheet. Rapid sweep. Water-soluble polymer stick // Schlumberger. 2017. URL: <https://www.slb.com/media/files/product-sheet/rapid-sweep-ps.ashx> (дата обращения 29.09.2022).
 20. Product Data Sheet. Poly-Drill Stick // Select Industries. 2021. URL: <https://selectindustries.com/wp-content/uploads/2021/12/Poly-Drill-Stick.pdf> (дата обращения 29.09.2022).
 21. Product Data Sheet. SAPP Stick // Select Industries. 2021. URL: <https://selectindustries.com/wp-content/uploads/2021/12/SAPP-Stick.pdf> (дата обращения 29.09.2022).
 22. Drilling Sticks // Varichem International. 2022. URL: <http://www.varichemusa.com/products.php?title=Drilling%20Sticks> (дата обращения 29.09.2022).
 23. Вязко упругий состав EASY CLEAN // ООО «СК НЭСТ». 2022. URL: https://nest78.ru/vyazko-uprugiy-sostav-easy-clean/?sphrase_id=1154 (дата обращения 29.09.2022).
 24. Продукция ООО НПО ХОС // ООО НПО ХОС. 2022. URL: <http://npohos.ru/catalog/> (дата обращения 09.10.2022).
 25. Integrated drilling optimization approach delivers excellent results to improve drilling efficiency in remote artificial island / P. Paila, C. Kirby, N. Diaz, A. Aboulkheir, D. Mahmoud, R. Al Kindi, Y. Kasem, M. Benygzer, R. Moreira, M. Cesetti, R. Singh // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. – Abu Dhabi, UAE, November 12–15, 2018. – 17 p.
 26. Александров С.С., Лагуманов М.Г. Регулирование очистки скважины в процессе бурения // Бурение & нефть. – 2013. – № 2. – С. 34–36.
 27. Unique acoustic telemetry network with distributed pressure measurement nodes enables accurate real-time analysis of sweep effectiveness / M. Reeves, D.G. Smith, D. Groves, A. Brehm, S.A. Rovira, K. Armagost // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – New Orleans, Louisiana, USA, September 30 – Oct. 2, 2013. – 20 p.
 28. Real time monitoring of hole cleaning on a deep water extend well / A.L. Martins, M.B. Villas-Boas, H.S. Taira, A.F. Aragao, R.A.F. Amorim, Y.D. Galeano, A. Bove, A.T.A. Waldmann // SPE/IADC Drilling Conference. – Amsterdam, The Netherlands, February 19–21, 2003. – 7 p.
 29. Королев А.С., Минаев К.М. Исследование полимерных реагентов в суспензионной форме для буровых растворов // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 75-летию Победы в Великой Отечественной войне. В 2 т. – Томск, 6–10 апреля 2020. – Томск: Изд-во ТПУ, 2020. – Т. 2. – С. 403–404.
 30. Королев А.С., Минаев К.М. Полимерные суспензии для эффективного бурения // Деловой журнал Neftegaz.ru. – 2021. – № 1 (109). – С. 84–88.

Поступила 18.10.2022 г.

Прошла рецензирование 17.11.2022 г.

Информация об авторах

Королев А.С., аспирант, ассистент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Минаев К.М., кандидат химических наук, директор центра «Научно-образовательный центр нефтегазовой химии и технологии», доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Сагитов Р.Р., инженер центра «Научно-образовательный центр нефтегазовой химии и технологии» Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.24.06

ANALYSIS OF AN ALTERNATIVE TECHNOLOGY FOR PREPARING AND APPLYING PILLS IN WELL DRILLING

Alexey S. Korolev¹,
korolev2818@gmail.com

Konstantin M. Minaev¹,
minaevkm@tpu.ru

Rashid R. Sagitov¹,
Sagitov_r@bk.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance. *Drilling engineers often use various types of pills that perform a variety of functions in well drilling, such as preventing different fluids in the well from contact, cleaning the wellbore, reducing friction forces, and eliminating drilling problems. In the vast majority of cases, only one method of preparing such liquids is used – advance preparation of pills in mud tanks, followed by pumping them in the well. The main disadvantages of this method are low manufacturability, the need to attract an additional fleet of tanks and increased consumption of reagents. Taking into account the widespread use of pill pumping technology during drilling, even minor optimization will reduce the cost of these operations. Weak publication activity on this topic necessitates more active study and coverage in the scientific and educational literature of traditional and alternative technologies for preparation and use of pills in well drilling.*

The main aim of the research is to consider the technology of sticks usage for pills preparation when drilling wells and to highlight the scope and limitations of this technology.

The object: sticks for pills preparation in well drilling.

Methods: analysis of pills varieties used in well drilling to highlight the requirements for their use and preparation, analysis and evaluation of traditional technology for pills preparation, analysis and evaluation of alternative technology for pills preparation using sticks.

Results. The authors identified the main types of pills used in well drilling, highlighted the advantages and disadvantages of stick usage for pills preparation, as well as their application areas according to the limitations.

Key words:

drilling mud, well cleaning, spacer pill, lost circulation pill, pill with a high content of lubricant, sweeping pill, fiber pill, stick.

REFERENCES

- Sorokin S.A., Spiridonov P.Yu. Issledovanie vliyaniya kontsentratsii smazyvayushchey dobavki v retsepture burovogo rastvora na koeffitsienty treniya [Investigation of the influence of the lubricant additive concentration in the drilling fluid formulation on friction coefficients]. *Ashirovskie chteniya* [Readings name of K.B. Ashirov]. Samara, Samara State Technical University Publ., 2018. pp. 88–97.
- Rad M.S.K., Mohammadi M.K., Nowtarki K.T. Investigating hole-cleaning fibers' mechanism to improve carrying cutting capacity and comparing their effectiveness with common polymeric pills. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, UAE, November 9–12, 2020. 10 p.
- Valluri S.G., Miska S.Z., Yu M., Ahmed R.M., Takach N. Experimental study of effective hole cleaning using «sweeps» in horizontal wellbores. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, Texas, USA, September 24–27, 2006. 13 p.
- Moroni L.P., Davidson M., Lam J., Goonoo A., Twydcross J., Howard S.K. Heavy-duty cleanup: caesium formate-based micro-emulsions make light work of a tough job. *Offshore Technology Conference Asia*. Kuala Lumpur, Malaysia, March 22–25, 2016. 11 p.
- Mi Swaco. *Rukovodstvo po burovym rastvoram dlya inzhenerov-tekhnologov*. Redaktsiya 2.1. [A guide to drilling fluids for process engineers. Edition 2.1.]. Moscow, Mi Swaco Publ., 2009. 1000 p.
- Kholopov E.A., Shiyon S.I., Musyichenko S.V., Morgun N.S. Drilling fluid preparation program for sidetracking in well № 1273 of the Urengoyevskoye Field. *Science. Technique. Technologies (Polytechnical bulletin)*, 2020, no. 2, pp. 267–278. In Rus.
- Dobrochasov A.I., Popova Zh.S., Salomatov V.A. Technical and technological solutions to increase the efficiency of drilling lateral horizontal trunks in the fields of Western Siberia. *Readings name of A.I. Bulatov*, 2017, vol. 3, pp. 76–82. In Rus.
- Czuprat O., Faugstad A.M., Byrski P., Schulze K. Hole cleaning efficiency of sweeping pills in horizontal wells – facts or philosophy? *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver, Colorado, USA, October 21, 2020. 28 p.
- Hemphill T. A comparison of high-viscosity and high-density sweeps as hole cleaning tools: Separating fact from fiction. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Florence, Italy, September 19–22, 2010. 8 p.
- Alomair A.A., Cuellar H.F., Kashwaa M., Sharma S. Exceeding technical limit for drilling and completing complex wells by using an optimized flat-rheology mud formulation: a comprehensive overview. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*. Abu Dhabi, UAE, May 25–27, 2021. 12 p.
- Gorpinchenko V.A., Dilmiev M.R. Using of synthetic polymeric fiber to increase efficiency of cuttings lifting during drilling with PDC Bits. *Drilling & Oil*, 2010, no. 6, pp. 6–8. In Rus.
- Bulgachev R.V., Pouget P. New experience in monofilament fiber tandem sweeps hole cleaning performance on Kharyaga Oilfield, Timan-Pechora Region of Russia. *SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition*. Moscow, Russia, October 3–6, 2006. 12 p.
- Korunov I.D., Ponomaryov S.A. Regulirovanie parametrov burovogo rastvora dlya snizheniya riska prikhvata na mestorozhdeniyakh Balykskoy gruppy [Regulation of drilling fluid parameters to reduce the risk of sticking in the fields of the Balyk group]. *Molodoy ucheny*, 2020, no. 6 (296), pp. 78–80.
- Wald H. L. *Product and method for treating well bores*. Patent 6655475B1 USA, 2002.
- Rapid sweep. Water-soluble polymer stick*. 2017. Available at: <https://www.slb.com/drilling/drilling-fluids-and-well-cementing/drilling-fluids/drilling-fluid-additives/viscosifiers/rapid-sweep-water-soluble-polymer-stick> (accessed: 28 September 2022).
- Rumyantseva E.A., Strizhnev K.V., Akimov N.I., Lysenko T.M., Volkov V.A. *Sposob udaleniya zhidkosti iz skvazhiny* [Method for removing fluid from a well]. Patent RF, no. 2317412, 2018.
- Drill Bit Stick*. 2022. Available at: <https://selectindustries.com/wp-content/uploads/2021/12/Drill-Bit-Stick.pdf> (accessed: 29 September 2022).

18. *HHL – Horizontal Hole Lubricants*. 2022. Available at: <https://www.hydrifotech.com/products/hhl-horizontal-hole-lubricants> (accessed: 29 September 2022).
19. *Product Sheet. Rapid sweep. Water-soluble polymer stick*. 2017. Available at: <https://www.slb.com/-/media/files/mi/product-sheet/rapid-sweep-ps.ashx> (accessed: 29 September 2022).
20. *Product Data Sheet. Poly-Drill Stick*. 2021. Available at: <https://selectindustries.com/wp-content/uploads/2021/12/Poly-Drill-Stick.pdf> (accessed: 29 September 2022).
21. *Product Data Sheet. SAPP Stick*. 2021. Available at: <https://selectindustries.com/wp-content/uploads/2021/12/SAPP-Stick.pdf> (accessed: 29 September 2022).
22. *Drilling Sticks*. 2022. Available at: <http://www.varichemusa.com/products.php?title=Drilling%20Sticks> (accessed: 29 September 2022).
23. *Visco-elastic compound EASY CLEAN*. 2022. Available at: https://nest78.ru/vyazko-uprugiy-sostav-easy-clean/?sphrase_id=1154 (accessed: 29 September 2022).
24. *Products of LLC NPO HOS*. 2022. Available at: <http://npohos.ru/catalog/> (accessed: 10 October 2022).
25. Paila P., Kirby C., Diaz N., Aboukheir A., Mahmoud D., Al Kindi R., Kasem Y., Benygzer M., Moreira R., Cesetti M., Singh R. Integrated drilling optimization approach delivers excellent results to improve drilling efficiency in remote artificial island. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, UAE, November 12–15, 2018. 17 p.
26. Aleksandrov S.S., Lugumanov M.G. Regime regulating of well clean-up during drilling. *Drilling & Oil*, 2013, no. 2, pp. 34–36. In Rus.
27. Reeves M., Smith D.G., Groves D., Brehm A., Rovira S.A., Armagost K. Unique acoustic telemetry network with distributed pressure measurement nodes enables accurate real-time analysis of sweep effectiveness. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, Louisiana, USA, September 30 – October 2, 2013. 20 p.
28. Martins A.L., Villas-Boas M.B., Taira H.S., Aragao A.F., Amorim R.A.F., Galeano Y.D., Bove A., Waldmann A.T.A. Real time monitoring of hole cleaning on a deepwater extend well. *SPE/IADC Drilling Conference*. Amsterdam, The Netherlands, February 19–21, 2003. 7 p.
29. Korolev A.S., Minaev K.M. Issledovanie polimernykh reagentov v suspenzionnoy forme dlya burovykh rastvorov [Study of polymeric reagents in suspension form for drilling fluids]. *Problemy geologii i osvoeniya neдр. XXIV Mezhdunarodny simpozium imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh* [Problems of geology and subsoil development. XXIV International Symposium named after academician M.A. Usov for students and young scientists]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2020. pp. 403–404.
30. Korolev A.S., Minaev K.M. Polimernye suspenzii dlya effektivnogo bureniya [Polymer suspensions for efficient drilling]. *De-lovoy zhurnal Neftegaz.ru*, 2021, no. 1 (109), pp. 84–88.

*Received: 18 October 2022.
Reviewed 17 November 2022.*

Information about the authors

Alexey S. Korolev, post-graduate student, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Konstantin M. Minaev, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Rashid R. Sagitov, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.83+552.5+553.98

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЯВНЫХ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ПЕСЧАНЫХ ИНТЕРВАЛОВ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКИ-КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ГИС

Мельник Игорь Анатольевич,
melnik@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность рассматриваемой темы связана с проблемой поиска пропущенных продуктивных низкоомных песчаных интервалов, существование которых обусловлено присутствием поверхностной электропроводимости в порах песчаной породы.

Целью данной работы является краткая иллюстрация результатов использования технологии статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин по поиску неявно-пропущенных низкоомных залежей нефти и газа.

Метод. В краткой форме показан метод статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин. Представлены теоретические физико-химические и формально-логические обоснования метода статистически-корреляционной интерпретации. Этот метод основан на принципах корреляции измеряемых и вычисляемых геофизических и петрофизических параметров исследуемого песчаного интервала, изменения которых вдоль скважины обусловлены доминирующими геохимическими процессами наложенного эпигенеза в определенном локальном интервале на территории глубокого флюидопроникновения. Произведение коэффициента аппроксимации и статистического интервального параметра двух выборок измеряемых характеристик соответствует статистической интенсивности процессов преобразования песчаных интервалов. На основе стандартного комплекса данных геофизических исследований скважин, используя метод статистически-корреляционной интерпретации каротажных диаграмм в песчаных пластах можно определять такие интенсивности вторичных процессов, как: пиритизация, каолинизация, пелтизация, карбонатизация и образования двойного электрического слоя в глинах, некоторые из них могут быть причиной неявного понижения удельного электрического сопротивления породы. Определенные граничные значения интенсивностей перечисленных вторичных процессов могут служить индикатором присутствия углеводородов в исследуемых пластах.

Результаты. Валидность метода статистически-корреляционной интерпретации данных каротажа скважин подтвердилась при сопоставлении результатов вычисления интенсивностей процессов преобразования с результатами петрографического анализа зерна. При определении интенсивности процессов трансформации минералов, влияющих на увеличение поверхностной электрической проводимости песчаной породы по Нижнегугинецкой скважине, были выделены перспективные низкоомные юрские пласты, нефтесодержание которых подтвердилось результатами спиртобензольной вытяжки зерна. На Вахском месторождении результаты выявления перспективных меловых пластов на основании использования технологии статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин подтвердились результатам испытаний пласта. В ранее пропущенном песчаном интервале была получена нефть. Причем в качестве индикатора присутствия углеводородов с вероятностью в 80 % выступил процесс вторичной карбонатизации.

Выводы. Вычисляя по материалам геофизических исследований скважин (как старого, так и нового фонда) интенсивности геохимических процессов в качестве индикаторов присутствия углеводородов, а также граничные значения данных интенсивностей в песчаных пластах, можно с ~80 % вероятностью выявлять неявно-пропущенные низкоомные залежи нефти и газа.

Ключевые слова:

Низкоомный коллектор, геофизические исследования скважин, углеводороды, вторичные процессы, наложенный эпигенез, пропущенные залежи нефти, методы выявления залежей УВ, корреляционная интерпретация ГИС.

Введение

Перспективные нефтегазонасыщенные интервалы, как правило, выявляют по результатам интерпретации электрических методов геофизических исследований скважин (ГИС). Если удельное электрическое сопротивление (УЭС) породы исследуемого коллектора выше граничной величины УЭС, определяющей и разделяющей нефтегазоносное и водоносное насыщение, то изучаемый интервал коллектора считается продуктивным. Однако в природе встречаются нефтегазоносные коллекторы с пониженным УЭС. В результате интерпретации материалов каротажа скважин данные интервалы относят к водонасыщенным и их не испытывают. Такие неявно-пропущенные пласты называют *низкоомными*.

Как зарубежные, так и отечественные исследователи причиной ошибочной интерпретации данных ГИС, не учитываемой при традиционном методе ана-

лиза каротажных диаграмм, называют образование электропроводящего слоя на поверхности пор. После петрографического и петрофизического изучения зерна были определены основные причины образования электропроводящих поверхностных слоев, обуславливающих появление коллекторов с пониженным УЭС:

1. Присутствие в породе электропроводящих минералов (пиритов, халькопиритов и других минералов с электронной проводимостью) [1–3].
2. Тонкое латеральное переслаивание глин с пониженным УЭС (в породе коллектора), не выделяемых по материалам ГИС (анизотропия пород) [4, 5].
3. Высокое содержание связанной воды, обусловленное значительными концентрациями иллита, смектита и микропористой структуры [6–12].
4. Интенсивные вторичные преобразования минералов в породе коллектора [5, 13, 14].

5. Дискретное увеличение показателя насыщения в законе Дахнова–Арчи, обусловленное неустойчивым течением многофазного потока в породе [15].
6. Понижение извилистости флюидопроводящих путей и образование трещин [5, 16].

На основе обобщения и проведенного анализа названных причин неявно-пропущенных коллекторов были определены две причинно-следственные цепи образования нефт егазоносных низкоомных коллекторов [5]:

1. Обстановка осадконакопления → полиминеральный песчаник → процесс сорбции → формирование связанной воды → образование электропроводящей поверхности → заполнение пор углеводородами (УВ) → формирование низкоомного коллектора.
2. Тектонический процесс → формирование флюидопроникающих зон и трещин → миграция глубинных флюидов → вторичный геохимический процесс наложенного эпигенеза → образования электропроводящих минералов и свободных катионов → появление поверхностной электропроводимости → заполнение коллектора нефтью и газом → образование коллектора с пониженным УЭС.

Выделены две первопричины появления низкоомных коллекторов, в результате которых формируются глинистые и микропористые песчаники либо полимиктовые песчаные породы с интенсивным вторичным преобразованием.

В настоящее время кроме метода каротажного кроссплота развивают метод нейронной сети при обучении искусственного интеллекта с целью поиска неявно-пропущенных залежей. В работе [17] показаны результаты интерпретации каротажа в контрастном нефтяном слое с низким удельным сопротивлением, где была применена технология опорных векторов (*support vectors model – SVM*). Результаты применения данной технологии в сравнении с результатами использования методов нейронных сетей подтвердили более высокую точность распознавания флюидов в модели *SVM*. Точность прогнозирования при использовании новейших методов обучения сетей в результате исследования коллекторов прежде всего связана с количеством и качеством введенных эмпирических данных. Предлагается новый метод интерпретации каротажных диаграмм (статистически-корреляционный), в результате которого в песчаных интервалах можно получить иную, геохимическую, информацию. Эту информацию можно использовать и в технологии обучения искусственного интеллекта.

В основе статистическо-корреляционного (СК) метода обнаружения низкоомных коллекторов лежит представление об образовании поверхностной электропроводимости в песчаной породе в результате процесса вторичного геохимического преобразования горных пород (наложенного эпигенеза) при поступлении глубинных флюидов [18, 19].

Целью данной работы является краткая иллюстрация результатов применения метода СК интерпретации материалов ГИС по поиску неявно-пропущенных низкоомных залежей нефти и газа.

Метод статистически-корреляционной интерпретации материалов ГИС

Представленный метод СК интерпретации подробно описан в учебнике [19]. Теоретическая концепция отражена в двух разделах:

- ГЕОХИМИЧЕСКИЕ основания, базируемые на доминирующих вторичных процессах наложенного эпигенеза в песчаных пластах;
- математические принципы, служащие формально-логическим ядром, доказывающим правомерность статистически-корреляционного подхода в определении интенсивности вторичных процессов.

Основная идея данного метода заложена в следующем *постулате*: если процесс преобразования геологической системы является *доминирующим* и *локальным* относительно фоновых процессов, к тому же приводящим к одновременным изменениям геохимических и петрофизических характеристик породы, то корреляционные параметры регрессий двух выборок измеряемых либо вычисляемых по ГИС характеристик будут представлять собой статистическую интенсивность доминирующего процесса.

Мигрирующие по проницаемым зонам земной коры флюиды формируют значительный наложено-эпигенетический «след» в коллекторах литосферы. В этом случае все диагенетически-катагенетические процессы в пласте приводят к однородному по площади минералосодержанию. А наложено-эпигенетический «след» в песчаных отложениях по сути локален, т. к. обусловлен присутствием глубинных разломов и является доминантным относительно других фоновых процессов.

Регистрируемые параметры и характеристики могут относиться к одним и тем же преобразованным элементам, а могут быть результатом единого процесса преобразования различных элементов. Величины данных измеряемых дискретных параметров в разрезе скважин будут представлять собой количественную характеристику выборочных значений. Основным условием корреляции регистрируемых выборочных параметров является доминирование исследуемого процесса, влияющего на данные параметры, относительно других параллельных процессов.

Измеряемые дискретные характеристики (А) и (В), зависящие от количества преобразованных элементов, будут взаимозависимо проявляться с различными вероятностями: $P(A)$ и $P(B)$. Например, с увеличением железосодержащих минералов вдоль разреза скважины исследуемого песчаного интервала УЭС породы уменьшается и степень уменьшения величины УЭС (А) соответствует степени увеличения содержания железа (В). Вероятность реализации двух событий (двухмерная) вычисляется через произведение [20]:

$$P(A;B)=P(A)P(B). \quad (1)$$

Двухмерная вероятность (1) в выборке измеряемых (вычисляемых по ГИС) дискретных характеристик зависит от степени влияния вторичных эпигенетических процессов на ковариационное изменение величин выборочных значений. Поэтому двухмерная вероятность будет эквивалентна коэффициенту корреляции

реляции (R) по модулю соответствующей линейной регрессии:

$$P(A;B) \sim |R|. \quad (2)$$

Введем *постулат интенсивности* – статистическая интенсивность процессов преобразования элементов открытой системы эквивалентна двумерной вероятности регистрируемых характеристик данных элементов:

$$i(A; B) \sim P(A;B) \sim |R|. \quad (3)$$

Очевидно, что коэффициент корреляции в первую очередь отражает качественную характеристику интенсивности. Чем больше величина данного коэффициента, тем значительней вероятность того, что корреляция между измеряемыми выборочными значениями обусловлена исследуемым процессом преобразования системы. Как правило, граничное значение коэффициента корреляции $R > |\pm 0,6|$ определяется общепринятым уровнем значимости 0,95.

В генеральной выборке двух массивов данных не всегда присутствует линейная корреляция между исследуемыми частями выборочных значений. Поэтому при вычислении статистической интенсивности в формулу (3) необходимо включить параметр, отражающий долю генеральной выборки, в которой линейная регрессия подчиняется условию: $R > |\pm 0,6|$.

Для определения доли интервала генеральной выборки, при выше представленном граничном условии, необходимо суммировать такие доли выборок интервалов в пределах всего массива данных, в которых наблюдаются корреляционные связи [19]:

$$Y = \frac{1}{Q} \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H p_h^j, \quad (4)$$

где p – выборка значений при $R_h > |\pm 0,6|$; Q – генеральная выборка всего исследуемого массива; H – число «интервальных» значений; J – количество «интервалов», причем $J < H \leq Q$, а если $H = Q$, то $J = 1$. Параметр Y – интервальная мера воздействия вторичных процессов, т. е. в этом случае представляет долю интервала исследуемого коллектора, в котором вещество испытывает преобразование. Обозначим его (4) как *интервальный параметр*.

Произведение вычисляемых статистических параметров:

$$i = YR^2, \quad (5)$$

именуем *статистической интенсивностью процессов преобразования*, показывающей количественную (Y) и качественную (R^2) характеристики статистически-корреляционных связей. В уравнении (5) вместо коэффициента корреляции (2) введен коэффициент аппроксимации для того, чтобы избежать применения модульного параметра.

Определение интенсивностей вторичных процессов (в соответствии с содержанием минералов) обусловлено вытекающими корреляционными связями [13, 18, 19]:

1. Обратная корреляция выборок содержания железа с УЭС породы соответствует пиритизации либо хлоритизации биотитов [1, 6].

2. Положительная корреляция глинистости с пористостью породы обусловлена вторичной каолинитизацией [20].
3. Отрицательная корреляция выборок УЭС породы с содержанием калия, как правило, обусловлена процессом вторичной пелитизации [7].
4. При условии увеличения карбонатизации песчаника положительная корреляция макроскопического сечения поглощения (МСП) тепловых нейтронов породы с относительным содержанием карбонатов продиктована вторичными карбонатами [18].
5. Отрицательная зависимость удельного сопротивления с глинистостью будет представлять собой параметр двойного электрического слоя (ДЭС), характеризующего степень влияния вторичных геохимических процессов на электропроводность диффузионного слоя глинистых минералов [7, 10, 17].

Вычислив статистические интенсивности перечисленных процессов в песчаных интервалах вдоль разреза исследуемых скважин (по материалам ГИС изучаемой площади УВ месторождения), необходимо сопоставить данные интенсивности в испытанных продуктивных и водонасыщенных интервалах. В этом случае можно определить не только индикатор присутствия УВ, но и его граничные величины с вероятностью ~80 %.

Далее, в рамках граничных величин выбранного индикатора, в неиспытанных пластах выделяем перспективные интервалы, в которых интенсивности таких процессов, как пиритизация, пелитизация и образование ДЭС, имеют значительную величину. Затем из составленной выборки перспективных интервалов удалим пласты с явным водонасыщением. Для оставшихся перспективных интервалов определяем приращенное УЭС, обусловленное поверхностной проводимостью, не учитываемой при традиционной интерпретации каротажных диаграмм [19].

При суммировании «истинного» УЭС (традиционного) с приращенным получим «действительное» УЭС, с учетом влияния поверхностной проводимости. Если «действительное» сопротивление больше граничной величины, то данный интервал будет считаться низкоомным.

В свою очередь, если изучается одна либо несколько скважин на различных месторождениях (участках), то «действительное» УЭС определяется в интервалах с неясным характером насыщения.

Покажем один из возможных алгоритмов определения «действительного» УЭС [18, 19]. При последовательном соединении поверхностного электросопротивления как твердой, так и вязкой фазы приращенное УЭС пласта (неучтенное при традиционной интерпретации данных ГИС) определяется как сумма приращенных сопротивлений среды для зарядов калия и железа, при условии их коллективного влияния на электропроводность породы в одном интервале измеряемого «истинного» сопротивления ρ_h .

На основании применения математического аппарата Microsoft Excel определяется линия тренда корреляционной зависимости и по степенной регрессии $\rho = bC_{hf}^{-a}$ определяется показатель степени a при ко-

эффиценте корреляции $R > |\pm 0,6|$ и $C_f = \langle C_{hf} \rangle / C_{\min}$. Индекс h обозначает количество выборочных значений исследуемого песчаного интервала, а индексы f и c обозначают железо и калий. В этом случае ρ_d – «действительное» УЭС – определяется следующим образом:

$$\rho_d = \rho_n (1 + (C_f^{+\alpha(f)} - 1) + (C_c^{+\alpha(c)} - 1)). \quad (6)$$

Эмпирические результаты

Технология СК интерпретации была изначально ориентирована на использование минимальной группы стандартных материалов ГИС, а именно на нейтронных и гамма-каротажей скважин, показания градиент-зонда кажущего сопротивления и на каротаж собственной поляризации: НГК (ННК_T); ГК; КС (ГЗ-3); ПС, что позволяло исследовать песчаные интервалы (с целью получения геохимической информации) всего разреза скважин по данным даже старого фонда [18]. Математический алгоритм и его апробация (с применением компьютерной программы) основывались на результатах лабораторных исследований керна.

Согласно разработанному методу дифференциация интегрального нейтронного (и гамма) поля в песчанике зависит от степени влияния содержаний железа, бора и калия на регистрируемую плотность потока радиоактивного излучения. Предварительно в каждом исследуемом песчаном интервале проводится усреднение (по интервалу) всех данных каротажа, и после определения водородосодержания вычисляются калибровочные коэффициенты используемых алгоритмов относительно априори принятых средних содержаний химических элементов в песчаной породе. Да-

лее, на основании системы двух уравнений, методом подбора вычисляются относительные содержания элементов бора и железа как наиболее влияющих (после водорода) на изменение плотности потока нейтронного поля в полимиктовом песчанике. Относительное содержание калия определяется по показанию ГК и содержанию бора. Макроскопическое сечение поглощения тепловых нейтронов песчаника вычислялось в последнюю очередь.

Валидность заявленной технологии вычисления относительных содержаний элементов подтвердилась при сопоставлении их программного определения по данным ГИС с результатами многоэлементного нейтронно-активационного анализа образцов песчаника. Коэффициенты линейной корреляции сопоставлений соответствуют: по железу +0,85; по бору +0,77; по калию +0,63 и МСП +0,9.

Приведем пример изучения одной скважины, где при стандартной интерпретации материалов ГИС характер насыщения исследуемых пластов определялся как неясный либо водонасыщенный [19]. По данным ГИС Нижнедугинецкой скважины в двух песчаных интервалах тюменской свиты, используя метод выявления низкоомного коллектора по одной скважине, было проведено вычисление приращенного УЭС, обусловленного поверхностной проводимостью. И после определения сопротивления пласта ρ_d по формуле (6) и сравнения его величины с граничным значением выделились два низкоомных нефтенасыщенных интервала. Данный прогноз инновационного метода интерпретации материалов ГИС Нижнедугинецкой скважины подтвердился результатами спиртобензольной вытяжки керна (рис. 1).

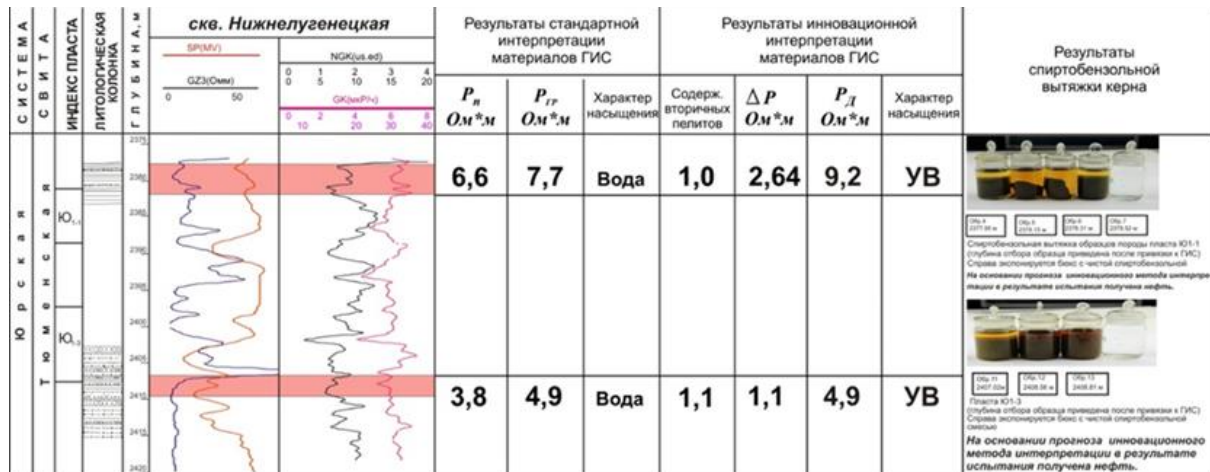


Рис. 1. Результат интерпретации низкоомного УВ насыщенного коллектора юрского горизонта, где P_n – «истинное» УЭС пласта, определенное традиционным способом; $P_{гр}$ – граничное значение УЭС пласта; приращенное УЭС пласта: $\Delta P = P_n (C_f^{+\alpha(f)} + C_c^{+\alpha(c)} - 2)$; «действительное» УЭС пласта: $P_d = P_n + \Delta P$

Fig. 1. Result of interpretation of low-resistivity SW of the saturated reservoir of the Jurassic horizon, where P – «true» reservoir resistivity determined in the traditional way; P_{gr} – boundary value of reservoir resistivity; incremental reservoir resistivity: $\Delta P = P_n (C_f^{+\alpha(f)} + C_c^{+\alpha(c)} - 2)$; «actual» reservoir resistivity: $P_d = P_n + \Delta P$

В свою очередь, если возникает необходимость в изучении всего месторождения, то по каждой скважине исследуется весь разрез, как правило, порядка 20–30 песчаных пластов. Здесь необходимо проводить

вычисление интенсивности вторичных процессов в нескольких десятках скважин по всему месторождению.

В процессе разработки нового метода интерпретации важно было удостовериться в его валидности

[18, 19]. Сопоставления вычисленных статистических интенсивностей вторичных процессов пиритизации, каолинитизации, пелитизации и карбонатизации в песчаных пластах с результатами петрографических исследований образцов керн на различных нефтегазовых месторождениях (площадях) Западной Сибири (например, Столбовой площади, Самотлора, Вынгайинского, Герасимовского, Тамбейского, Болтного месторождений и т. д.) позволили удостовериться в валидности метода СК интерпретации. Коэффициент корреляции линейной зависимости между выборками интенсивности процессов и содержанием вторичным минералов всегда находился в пределах 0,62–0,97.

Например, методом СК интерпретации данных ГИС были изучены 22 песчаных интервала в четырех скважинах различных участков Томской области. Было проведено сопоставление вычисленных интенсивностей вторичных процессов с результатами петрографических исследований песчаной породы 58-ми образцов на предмет содержания вторичных карбонатов, пелитов и каолинитов. Полученный коэффициент корреляции (0,92) линейного тренда явился подтверждением валидности рассматриваемого метода (рис. 2). Здесь параметр, зависящий от интенсивности вторичных процессов: $G(\text{теор}) = \beta L n(i+1) \pm \text{const}$, где β – постоянная величина для каждого процесса, i – статистическая интенсивность.

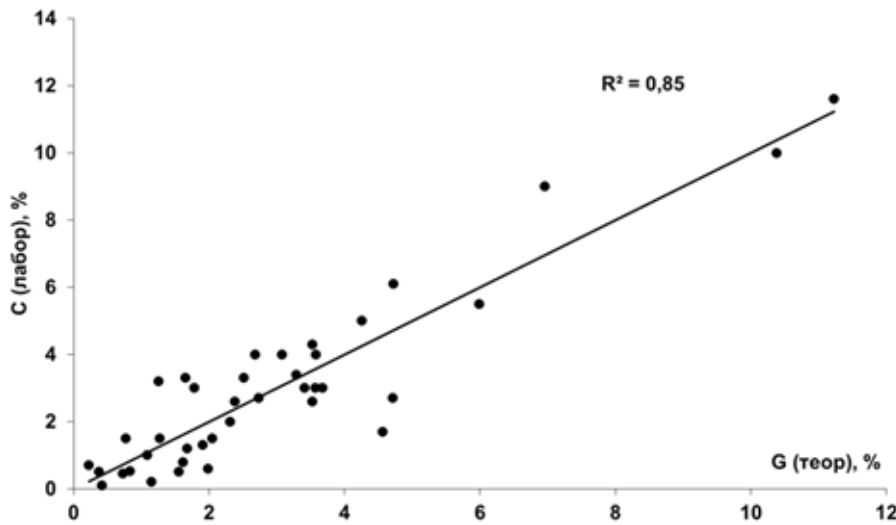


Рис. 2. Сопоставление средних содержаний вторичных каолинитов, пелитов и карбонатов, определённых по керну, с логарифмическим параметром статистической интенсивности данных процессов

Fig. 2. Comparison of the average content of secondary kaolinite, pelite and carbonate determined from the core with the logarithmic parameter of the statistical intensity of these processes

Таблица 1. Усредненные результаты СК интерпретации ГИС для нефте- и водонасыщенных интервалов Вахского месторождения

Table 1. Averaged results of SC interpretation of GIS for oil- and water-saturated intervals of the Vakh field

Насыщение Saturation	$\langle i_{\text{као}} \rangle$ Kaolinitization intensity	$\langle i_{\text{карб}} \rangle$ Carbonatization intensity	$\langle i_{\text{пир}} \rangle$ Pyritization intensity	$\langle i_{\text{пел}} \rangle$ Pelitization intensity
	усл. ед./cond. units			
Нефть (Н) Oil (O)	0,15	0,30	0,31	0,18
Вода (В) Water (W)	0,20	0,23	0,31	0,23
Н/В/О/В	0,75	1,3	1	0,78

Проиллюстрируем некоторые результаты исследования Вахского месторождения (Томская область) по поиску пропущенных низкоомных залежей. С этой целью было изучено 27 скважин восточного склона купольной части месторождения, в среднем по 17–20 песчаных интервалов мезозойской толщи. По результатам ранее проведенных испытаний пласта Ю₁ почти во всех интервалах была обнаружена нефть. Для определения геохимического индикатора необходимо

было провести сопоставления интенсивностей вторичных процессов в водоносных пластах. В работе [21] представлено, что в исследуемом районе ачимовская толща в значительной степени глинизирована либо водонасыщена. Поэтому нами априори все ачимовские песчаники мегионской свиты принимались в качестве водоносных пластов. В табл. 1 показаны усредненные статистические интенсивности различных вторичных процессов для водоносных и нефтеносных интервалов. Заметно, что усредненная интенсивность вторичных карбонатов в нефтеносных интервалах на 30 % превышает данные показатели в водоносных песчаниках, а вторичная каолинитизация, наоборот, уменьшается на 25 %. Эти интенсивности были выбраны в качестве индикаторов присутствия нефти.

Проведенный статистический анализ выборочных значений интенсивностей вторичных каолинитизации и карбонатизации в водонасыщенных и нефтеносных пластах позволил определить следующие граничные величины данных индикаторов: $i_{\text{карб}} > 0,34$ усл. ед. и $i_{\text{као}} < 0,07$ усл. ед., с 75 % вероятностью присутствия УВ. Граничная величина интенсивности карбонатизации определялась следующим образом. На основании отсортированных по возрастанию эталонных в выборочных данных интенсивностей карбонатизации

всех водо- и УВ насыщенных интервалов (генеральная выборка) была выделена выборочная область с граничной интенсивностью карбонатизации более

0,34, при этом в этих границах получена выборка значений с вероятностью встречаемости УВ насыщенного интервала в 75 %.

Таблица 2. Результаты СК интерпретации материалов ГИС меловых пластов с пониженным УЭС
Table 2. Results of SC interpretation of GIS materials of Cretaceous strata with reduced resistivity

Название скважины Well name	Интервал, м, (пласт) Interval, m, (layer)	$\rho_{п}$ «True» resistivity	$\rho_{гр}$ Boundary resistivity	$i_{каол}$ Kaolinitization intensity	$i_{карб}$ Carbonatization intensity,	$i_{пир}$ Pyritization intensity	$i_{пел}$ Pelitization intensity	Насыщение Saturation
		Ом/Ohmm		усл. ед./cond. units				
Вахская 335 (Vakh 335)	1980,2–1986,4(Б8)	4,0	4,2	0	0,14	0,07	0,15	Вода Water
Вахская 606 (Vakh 606)	2088,4–2093,0(Б9)	4,5	6,6	0	0,45	0,17	0,70	Нефть Oil

На предмет выявления пропущенных залежей были изучены меловые пласты. В качестве примера покажем два выявленных низкоомных интервала ($\rho_{п} < \rho_{гр}$) в меловых отложениях, один из которых определен как перспективный низкоомный, ранее пропущенный пласт (Вахская 606, пласт Б9). Второй – как менее перспективный, не соответствующий по критерию статистической интенсивности вторичной карбонатизации (табл. 2). В дальнейшем по результатам СК интерпретации оба пласта были испытаны.

В результате испытания пропущенного низкоомного пласта Б9 скважины Вахская 606 (выявленного

по данной методике) был получен среднесуточный дебит нефти 18 т в сутки (рис. 3). На рис. 3 показан подсчетный план 2016 г., где пласт Б9 скважины 606 ранее (по материалам ГИС) был интерпретирован как невязный характер насыщения (мощность интервала 1,2 м). Во втором интервале (Вахская 335, Б8) получена вода. Понижение УЭС пласта Б9 объясняется повышенной поверхностной проводимостью глинистых минералов вследствие существенного процесса вторичной пелитизации. Пласт Б8 сильно отличается от пласта Б9 отсутствием поверхностной электропроводности, обусловленной вторичными процессами.

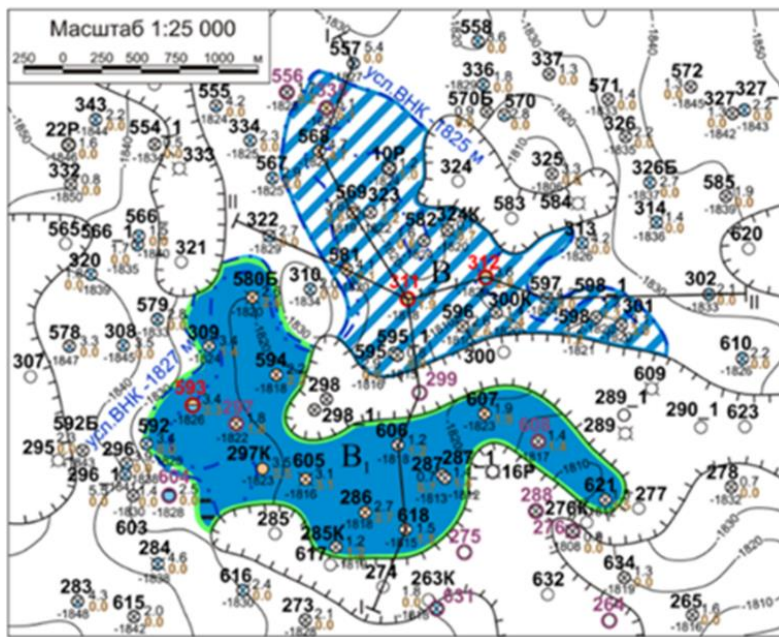


Рис. 3. Подсчётный план 2016 г. по залежам пласта Б9 Вахского месторождения, где $\otimes \circ$ – скважины с пластом-коллектором и неколлектором; $\blacksquare \square$ – нефтеносная площадь и площадь прироста запасов категории В1; \sim – изолинии кровли пласта

Fig. 3. 2016 assay plan for the B9 reservoirs of the Vakh field, where $\otimes \circ$ – wells with reservoirs and non-collectors; $\blacksquare \square$ – oil-bearing area and B1 reserves increment area; \sim – isolines of the formation roof

В следствие того, что в основе процессов, регистрируемых представленным методом, лежит процесс наложенного эпигенеза, вычисляемые интенсивности вторичных изменений должны зависеть от расстояния до глубинно-вертикальной фильтрации флюидов. В работах [18–20] показано семейство обратно-экспоненциальных зависимостей статистической ин-

тенсивности вторичной каолинитизации (усреднённой по скважине в меловых и юрских интервалах) от расстояния до разломов растяжения по фундаменту и баженовской свите. Теоретическая кривая полностью соответствовала эмпирическому тренду. Данные регрессии с коэффициентом корреляции более 0,9. Также определено семейство обратногологарифмических

регрессий интенсивностей пиритизации в зависимости от усреднённой трещиноватости песчаных пластов по скважине.

В свою очередь, другим исследователем на основании выборочных данных получена корреляционная обратно-экспоненциальная связь интенсивностей пиритизации верхнеюрских пластов нефтегазового месторождения (Сургутский свод) в зависимости от расстояния до фильтрационных разломов по фундаменту [22]. Причем интенсивность пиритизации явилась индикатором продуктивности юрских пластов и одновременно причиной понижения УЭС пласта.

Заключение

Итак, общий анализ полученных результатов позволяет сформулировать следующий вывод: представляемый метод статистически-корреляционной интерпретации материалов ГИС для поиска пропущенных УВ насыщенных низкоомных коллекторов в терригенных пластах, даже по материалам старого фонда, в своей сути полностью валиден. Он основан на геохимических процессах наложенного эпигенеза при условиях доминанты и локальности относительно фоновых процессов. Формально-логические доказательства базируются на утверждении о том, что статистическая интенсивность исследуемого вторичного процесса эквивалентна двумерной вероятности регистрируемых (вычисляемых) петрофизических, геохимических данных и материалов ГИС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ежова А.В. Методика оценки нефтенасыщенности низкоомных коллекторов в юрских отложениях Юго-Востока Западно-Сибирской плиты // Известия ТПУ. – 2006. – Т. 309. – № 6. – С. 23–26.
2. The lowdown on low-resistivity pay / A. Boyd, H. Darling, J. Tabanou, B. Davis, B. Lyon, Ch. Flaum, J. Klein, R.M. Sneider, A. Sibbit, J. Singer // Research Gate. – 1995. – V. 3. – № 7. – P. 12. URL: https://www.researchgate.net/publication/291306240_Lowdown_on_low-resistivity_pay (дата обращения 10.10.2022).
3. Investigation of the origin of low resistivity and methods for the calculation of gas saturation in shale gas reservoirs in the Fuling area / Shi Wenrui, Zhang Zhansong, Huang Zisang, Jiang Shu, Shen Jincui, Feng Aiguo, Zhao Hongyan, Xing Jun // Energy Fuels. – 2021. – V. 35. – № 6. – P. 5181–5193. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.1c00087> (дата обращения 10.10.2022).
4. Проблема выделения низкоомных коллекторов сложного строения юрских отложений Каймысовского свода / Ю.А. Чикишев, Н.П. Ковалев, В.А. Резниченко, Р.А. Шишкин // НТВ ОАО «НК «Роснефть». – 2008. – № 1. – С. 17–21.
5. Мельник И.А. Причины образования нефтенасыщенных низкоомных коллекторов // Геология нефти и газа. – 2018. – № 6. – С. 129–136.
6. Зарипов О.Г., Сонич В.П. Влияние литологии пород-коллекторов на удельное электрическое сопротивление пластов // Нефтяное хозяйство. – 2001. – № 9. – С. 18–21.
7. Зубков М.Ю. Кристаллографическое и литолого-петрографическое обоснование электрических свойств минералов железа, глини и терригенных коллекторов (на примере пластов БВ8 и ЮВ1 Повховского месторождения (Часть 1)) // Горные ведомости. – 2008. – № 11. – С. 20–32.
8. Особенности строения и оценки нефтенасыщенности верхнеюрских низкоомных коллекторов на примере Ватьганского месторождения Западной Сибири / А.Д. Комова, Т.Ф. Дьяконова, Т.Г. Исакова, Л.К. Бата, А.А. Калугин, В.Ю. Терентьев // Экспозиция Нефть Гав. – 2016. – Т. 53. – № 7. – С. 17–21.
9. Lowdown of resistivity: effects of microporosity on oil bearing deltafront sandstones, North Jotana, Cambay Basin, India and identification methods / H.S. Bhattacharya, V. Pratap, G.C. Deb, V. Siva, T.K. Das // 5th Conference & Exposition on Petroleum Geophysics. – Hyderabad, – India, 2004. – P. 115–123. URL: https://spgindia.org/conference/5thconf_hyd04/53046.PDF (дата обращения 10.10.2022).
10. Logging-based assessment of low-resistivity oil zones: a case study from Sudan / Li Chunmeia, Wu Furong, Zang Dianguang, Peng Caia, Guo Hongxib, Li Jiea // Energi Geoscience. – 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.11.005> (дата обращения 10.10.2022).
11. Integrated analysis of the low resistivity hydrocarbon reservoir in the «S» field // Indonesian Petroleum Association. – May, 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.29118/IPA.0.16.436.SE> (дата обращения 12.10.2022).
12. Studies of electrical properties of low-resistivity sandstones based on digital rock technology / Weichao Yan, Jianmeng Sun, Jinyan Zhang, Weiguo Yuan, Li Zhang, Likai Cui, Huaimin Dong // Journal of Geophysics and Engineering. – 2018. – V. 15. – Iss. 1. – P. 153–163. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-2140/aa8715> (дата обращения 12.10.2022).
13. Бужук Л.А., Полицев А.В., Архипова Л.Д. Влияние вторичных преобразований пород-коллекторов на электрофизические свойства по результатам электронномикроскопических исследований // Шестые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича: Сб. материалов конференции. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – С. 52–55.
14. Гипотеза причины образования низкоомного коллектора на Катыльгинском месторождении / С.М. Шевченко, В.Н. Шевченко, О.В. Губарев, А.П. Бушковский // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2008. – № 6. – С. 13–15.
15. Liu Zoulin, Moysey Stephen M.J. The dependence of electrical resistivity-saturation relationships on multiphase flow instability // International Scholarly Research Notices. – 2012. – V. 2012. – 10 p. URL: <https://doi.org/10.5402/2012/270750> (дата обращения 12.10.2022).

16. Saturation evaluation of microporous low resistivity carbonate oil pays in Rub Al Khali Basin in the Middle East / Wang Yongjun, Sun Yuanhui, Yang Siyu, Wu Shuhong, Liu Hui, Tong Min, Lyu Hengyu // Petroleum Exploration and Development. – 2022. – V. 49. – № 1. – P. 94–106. URL: [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(22\)60007-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60007-7) (дата обращения 12.10.2022).
17. Study on the interpretation method of low resistivity contrast oil reservoir based on support vector machine – taking the Chang 8 tight sandstone reservoir of Yanchang Formation in Huanxian Area, Ordos Basin as an example / Bai Ze, Tan Maojin, Shi Yujiang, Guan Xingning. URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-985788/v1> (дата обращения 12.10.2022).
18. Мельник И.А. Определение интенсивности геохимических процессов по материалам геофизических исследований скважин. – Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 2016. – 146 с.
19. Мельник И.А. Основы статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин. – М.: Изд-во «РУСА ИНС», 2022. – 76 с.
20. Мельник И.А. Определение статистической интенсивности вторичных геохимических процессов по материалам каротажа скважин // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 1. – С. 16–20.
21. Барашков С.В., Голубков Д.Е. Поиск пропущенных залежей: организация, реализация и результаты // Территория нефтегаз. – 2017. – № 1–2. – С. 28–34.
22. Никитин И.А. Факторы, влияющие и определяющие характер насыщения низкоомных коллекторов на примере месторождения Сургутского свода // East European Scientific Journal. – 2021. – V. 2. – № 12 (76). – P. 43–52. URL: <https://doi.org/10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.76.208> (дата обращения 17.08.2022).

Поступила 18.10.2022 г.

Прошла рецензирование 11.11.2022 г.

Информация об авторах

Мельник И.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.83+552.5+553.98

DETERMINATION OF IMPLICIT OIL-AND-GAS-BEARING SAND INTERVALS BY STATISTICAL-CORRELATION INTERPRETATION OF GWS DATA

Igor A. Melnik,
melnik@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia

The relevance of the considered topic is related to the problem of searching for missed productive low-resistance sand intervals, the existence of which is caused by the presence of surface electrical conductivity in the pores of sandy rock.

The purpose of this work is to illustrate briefly the results of using the technology of statistical-correlation interpretation of geophysical well logging in the search for implicitly missed low resistivity oil and gas reservoirs.

Method. This paper briefly shows the method of statistical-correlation interpretation of well logging materials. Theoretical physico-chemical and formal-logical justifications of the method of statistical-correlation interpretation are presented. This method is based on the principles of correlation of measured and calculated geophysical and petrophysical parameters of the studied sand interval, which changes along the well are caused by dominant geochemical processes of superimposed epigenesis in a certain local interval in the territory of deep fluid penetration. The product of the approximation coefficient and the statistical interval parameter of two samples of measured characteristics corresponds to the statistical intensity of sand interval transformation processes. On the basis of a standard set of geophysical well logging data, using the method of statistical-correlation interpretation of well logs in sandy formations it is possible to determine the intensity of secondary processes such as pyritization, kaoliniteization, peltization, carbonatization and formation of a double electric layer in clays, some of which may be the cause of an implicit decrease in the electrical resistivity of the rock. Certain boundary values of the intensities of these secondary processes may serve as an indicator of the presence of hydrocarbons in the studied formations.

Results. The validity of the statistical-correlation method of well logging data interpretation was confirmed when comparing the results of calculating the intensities of transformation processes with the results of petrographic core analysis. By determining the intensities of mineral transformation processes affecting the increase in surface electrical conductivity of sandy rocks in the Nizhneluginetskaya well, promising Jurassic reservoirs were identified, which were confirmed by the results of core alcohol-benzene extraction. In the Vakh field, the results of identifying promising Cretaceous reservoirs on the basis of the use of technology of statistical-correlation interpretation of logging data were confirmed by the results of formation tests. In the previously missed sand interval oil was obtained. And, secondary carbonatization was an indicator of the presence of hydrocarbons with a probability of 80 %.

Conclusions. If we use well logging data (both old and new fund) to calculate the intensity of geochemical processes as an indicator of the presence of hydrocarbons and the boundary values of these intensities in the sandy formations, it is possible with ~80 % probability to reveal the implicitly missed low-resistance oil and gas reservoirs.

Key words:

Low-ohmic reservoir, geophysical well surveys, hydrocarbons, secondary processes, superimposed epigenesis, missed oil deposits, methods of revealing HC deposits, correlation interpretation of logging.

REFERENCES

- Ezhova A.V. Methodology for estimation of oil saturation of low reservoirs in Jurassic deposits of the southeast West Siberian plate. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 6, pp. 23–26. In Rus.
- Boyd A., Darling H., Tabanou J., Davis B., Lyon B., Flaum Ch., Klein J., Sneider R.M., Sibbit A., Singer J. The lowdown on low-resistivity pay. *Research Gate*, 1995, vol. 3, no. 7, p. 12. Available at: https://www.researchgate.net/publication/291306240_Lowdown_on_low-resistivity_pay (accessed 10 October 2022).
- Shi Wenrui, Zhang Zhansong, Huang Zisang, Jiang Shu, Shen Jincui, Feng Aiguo, Zhao Hongyan, Xing Jun. Investigation of the origin of low resistivity and methods for the calculation of gas saturation in shale gas reservoirs in the Fuling area. *Energy Fuels*, 2021, vol. 35, no. 6, pp. 5181–5193. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.1c00087> (accessed 10 October 2022).
- Chikishev Yu.A., Kovaleva N.P., Reznichenko V.A., Shishkin R.A. Problema vydeleniya nizkooimnykh kollektorov slozhnogo stroeniya yurskikh otlozheniy Kaymysovskogo svoda [Problem of identifying low-resistance reservoirs in the complex structure of Jurassic deposits of the Kaimysovsky Vault]. *NTV OAO «NK «Rosneft»*, 2008, no. 1, pp.17–21.
- Melnik I.A. Reasons for formation of low-resistivity oil saturated reservoirs. *Oil and gas geology*, 2018, no. 6, pp. 129–136. In Rus. DOI: 10.31087/0016-7894-2018-6-129-136.
- Zaripov O.G., Sonich V.P. Vliyaniye litologii porod-kollektorov na udelnoye elektricheskoye soprotivleniye plastov [Influence of reservoir rock lithology on reservoir resistivity]. *Neftyanoe khozyajstvo*, 2001, no. 9, pp. 18–21.
- Zubkov M.Yu. Kristallograficheskoe i litologo-petrograficheskoe obosnovaniye elektricheskikh svoystv mineralov zheleza, glin i terri-gennykh kollektorov (na primere plastov BV8 i Yu VI Povkhovskogo mestorozhdeniya. (Chast 1) [Crystallographic and lithological-petrographic substantiation of electrical properties of iron minerals, clays and terrigenous reservoirs (by the example of BV8 and SW1 formations of the Povkhovskoe deposit (Part 1)]. *Gornye vedomosti*, 2008, no. 11, pp. 20–32.
- Komova A.D., Dyakonova T.F., Isakova T.G., Bata L.K., Kalugin A.A., Terentev V.Yu. Features of the structure and evaluation of oil saturation factor of low-resistivity upper Jurassic reservoirs on example of the Vat'egan field of Western Siberia. *Ekspozitsiya Neft Gaz*, 2016, vol. 53, no. 7, pp. 17–21. In Rus.
- Bhattacharya H.S., Pratap V., Deb G.C., Siva V., Das T.K. Lowdown of resistivity: effects of microporosity on oil bearing deltafront sandstones, North Jotana, Cambay Basin, India and identification methods. *5th Conference & Exposition on Petroleum Geophysics*. Hyderabad, India, 2004. pp. 115–123. Available at: https://spgindia.org/conference/5thconf_hyd04/53046.PDF (accessed 10 October 2022).
- Li Chunmei, Wu Furong, Zang Dianguang, Peng Caia, Guo Hongxib, Li Jiea. Logging-based assessment of low-resistivity oil zones: A case study from Sudan. *Energy Geoscience*, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.11.005> (accessed 10 October 2022).
- Integrated analysis of the low resistivity hydrocarbon reservoir in the «S» field. *Indonesian Petroleum Association*. May, 2016.

- Available at: <http://dx.doi.org/10.29118/IPA.0.16.436.SE> (accessed 10 October 2022).
12. Weichao Yan, Jianmeng Sun, Jinyan Zhang, Weiguo Yuan, Li Zhang, Likai Cui, Huaimin Dong. Studies of electrical properties of low-resistivity sandstones based on digital rock technology. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2018, vol. 15, Iss. 1, pp. 153–163. Available at: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-2140/aa8715> (accessed 12 October 2022).
 13. Buzhuk L.A., Polivtsev A.V., Arkhipova L.D. Vliyaniye vtorichnykh preobrazovaniy poro d-kollektorov na elektrofizicheskie svoystva po rezul'tatam elektronomikroskopicheskikh issledovaniy [Influence of secondary transformations of reservoir rocks on the electrophysical properties according to the results of electron microscopic studies]. *Sbornik materialov konferentsii. Shestye nauchnye chteniya pamyati Yu.P. Bulashevicha* [Proceedings of the conference. Sixth scientific readings in memory of Yu.P. Bulashevich]. Yekaterinburg, Russian Academy of Sciences Ural Branch Publ., 2011. pp. 52–55.
 14. Shevchenko S.M., Shevchenko V.N., Gubarev O.V., Bushkovsky A.P. Gipoteza prichiny obrazovaniya nizkoomnogo kolektora na Katylginskoy mestorozhdenii [Hypothesis of the cause of low reservoir formation in the Katylginskoye field]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*, 2008, no. 6, pp. 13–15.
 15. Liu Zoulin, Moysey Stephen M.J. The dependence of electrical resistivity-saturation relationships on multiphase flow instability. *International Scholarly Research Notices*, 2012, vol. 2012, 10 p. Available at: <https://doi.org/10.5402/2012/270750> (accessed 12 October 2022).
 16. Wang Yongjun, Sun Yuanhui, Yang Siyu, Wu Shuhong, Liu Hui, Tong Min, Lyu Hengyu. Saturation evaluation of microporous low resistivity carbonate oil pays in Rub Al Khali Basin in the Middle East. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, vol. 49, no. 1, pp. 94–106. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(22\)60007-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60007-7) (accessed 12 October 2022).
 17. Study on the interpretation method of low resistivity contrast oil reservoir based on support vector machine – taking the Chang 8 tight sandstone reservoir of Yanchang Formation in Huanxian Area, Ordos Basin as an example. Available at: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-985788/v1> (accessed 12 October 2022).
 18. Melnik I.A. *Opredelenie intensivnosti geokhimicheskikh protsessov po materialam geofizicheskikh issledovaniy skvazhin* [Determination of the intensity of geochemical processes based on geophysical well survey data]. Novosibirsk, SNIIGGiMS Publ., 2016. 146 p.
 19. Melnik I.A. *Osnovy statisticheskoi-korrelatsionnoy interpretatsii materialov geofizicheskikh issledovaniy skvazhin* [Fundamentals of statistical and correlation interpretation of geophysical well survey data]. Moscow, RUSAJNS Publ., 2022. 76 p.
 20. Melnik I.A. Determination of statistical intensity of secondary geochemical processes based on well logging data. *Oil Industry*, 2022, no. 1, pp. 16–20. In Rus.
 21. Barashkov S.V., Golubkov D.E. Poisk propushchennykh zalezhey: organizatsiya, realizatsiya i rezul'taty [Search for missed deposits: organization, implementation and results]. *Territoriya neftegaz*, 2017, no. 1–2, pp. 28–34.
 22. Nikitin I. Factors influencing and determining the Nature of the Saturation of low resistance reservoirs by the Example of the Surgutsky arch field. *East European Scientific Journal*, 2021, vol. 2, no. 12 (76), pp. 43–52. Available at: <https://doi.org/10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.76.208> (accessed 17 August 2022).

Received: 18 October 2022.

Reviewed: 11 November 2022.

Information about the authors

Igor A. Melnik, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.041:553.2

ЗОЛОТО В РУДАХ ВЕРНИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ИРКУТСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Николаева Анастасия Николаевна¹,
nikolaevaanas759@gmail.com

Мазуров Алексей Карпович¹,
akm@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена слабой изученностью вещественного состава руд Вернинского месторождения. Полученные данные являются важным инструментом не только для уточнения прогностико-поисковых критериев золоторудного месторождения углеродистых черносланцевых толщ, но также будут способствовать увеличению извлечения золота из руды за счет корректировки технологической схемы обогащения.

Основная цель: изучение минеральной формы золота в рудах.

Объектом исследования являются руды Северной зоны Вернинского месторождения.

Методы: стандартные петрографические и минераграфические анализы, а также сканирующая электронная микроскопия.

Результаты. Проведенными исследованиями установлено, что оруденение представлено двумя морфологическими типами: вкрапленный и прожилково-вкрапленный. Значительная часть рудной минерализации приурочена ко второму типу. Выявлено, что золото представлено в виде самородного с высокой пробой, большая его часть (75...80 %) приурочена к прожилково-вкрапленному типу. Самородное золото диагностировано преимущественно в ассоциации с арсенопиритом и пиритом. Многообразие форм выделений является одной из специфических особенностей самородного золота на данном месторождении, при этом отмечается господство в рудах золота неправильной формы. Для вариации диагностированных форм отмечается общая характерная черта – подчиненность полостям, существовавшим ранее, к началу или во время кристаллизации самого золота. При этом генезис данных полостей и непосредственно их очертания, а также расположение в рудах достаточно различны. Одной из наиболее распространенных морфологических разновидностей золота в рудах является проволочковидная форма, отличающаяся в трещинах катаклаза в арсенопирите, в меньшей степени диагностируются амебообразные и каплевидные формы, образующие многочисленные мельчайшие включения самородного металла в рудах.

Ключевые слова:

Восточная Сибирь, золото-сульфидный геолого-промышленный тип, углеродистые толщи, текстурно-структурные особенности, сульфиды, золото, минеральная форма.

Введение

Вернинское месторождение углеродистых терригенных толщ входит в состав Ленской золотоносной провинции, являющейся одной из крупнейших провинций по запасам золота во всем мире [1]. Золоторудное месторождение расположено в центральной части Бодайбинского района Иркутской области, в 146 км от города Бодайбо (рис. 1, а). Было открыто в 1974 г., и до 1999 г. с перерывами продолжалась его разведка. По существу, является западным флангом крупнейшего месторождения золота Сухой Лог.

По состоянию на 2019 г. оцененные и доказанные ресурсы золота составляли около 140 т при среднем содержании золота в руде 2,3 грамма на тонну. Большая часть запасов находится в трех рудных телах и представлена прожилково-вкрапленными рудами [2].

Для добычи золота в 2004 г. ОАО «Полюс золото» была создана Ленская золоторудная компания, а в 2005 г. приобретена лицензия на отработку Вернинского месторождения [2]. С середины 2006 г. было начато строительство горно-обогатительного комплекса, который в 2012 г. был введен в эксплуатацию по полной технологической схеме.

Материал и методика исследования

Морфология золота и вещественный состав руд были изучены по пробам, отобранным из керна скважин, пробуренных по Северной рудной зоне в 2005 г.

Вес керновых проб составлял 4...5 кг. Отбор материала в пробу производился после отбора керна на определение золота. Первоначально образцы были макроскопически описаны. Далее отобранные пробы были детально изучены и описаны с помощью петрографического и минераграфического исследований.

Все петрографические и минераграфические описания, включая фотодокументацию, были выполнены на исследовательском микроскопе Zeiss Imager 2m.

Для изучения минеральной формы золота, а также его морфологических особенностей и характера сростания с другими минералами была использована сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) на микроскопе Tescan Vega 3SBU с термоэмиссионным вольфрамовым катодом. В процессе исследований проводилась съемка поверхности руд и качественное определение состава зёрен по всей площади. Особое внимание уделялось разнообразным включениям золота и его взаимоотношению с другими минералами.

Геологическое строение

Месторождение сложено породами нижней и средней подсвиты Аунакитской свиты позднего рифея, образующих опрокинутую на юг Вернинскую антиклиналь субширотного простирания. Нижняя подсвита Аунакитской свиты (R_{3au}³) является основной рудовмещающей толщей (рис. 1, б) [3]. Мощность ее варьирует от 165 до 235 м.

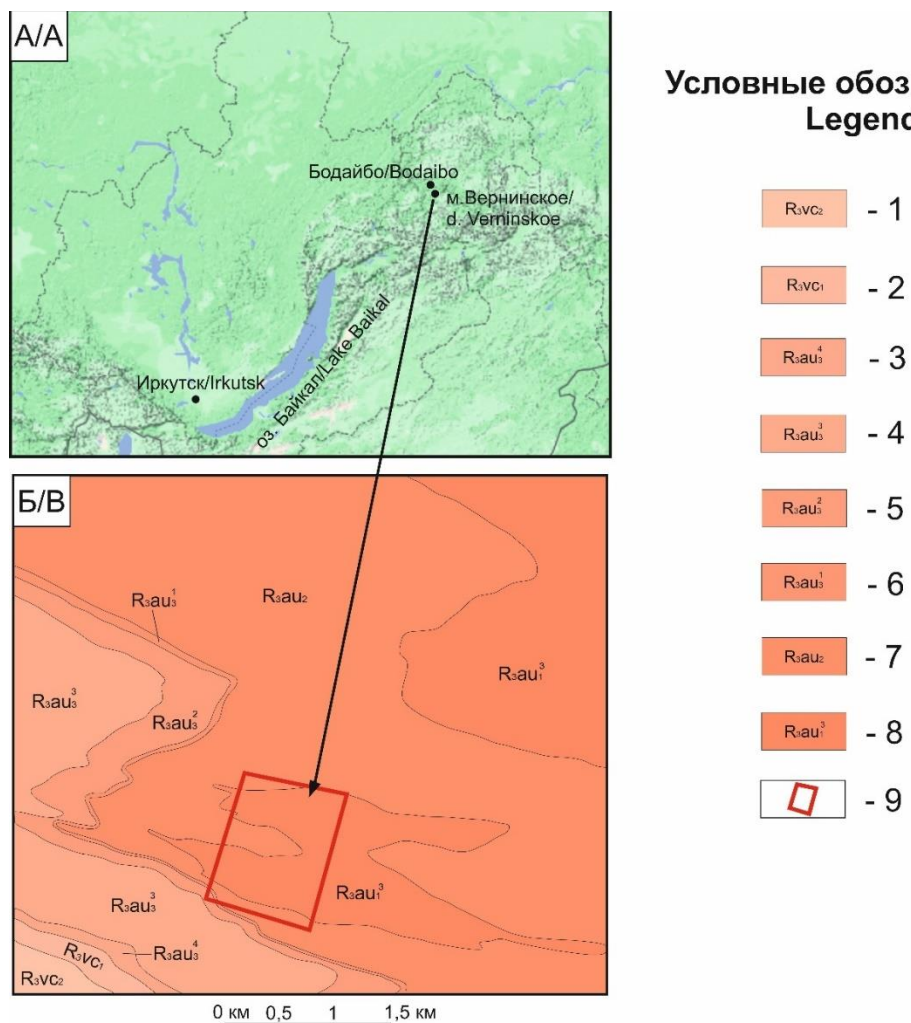


Рис. 1. Географическое положение (А) и геологическое строение (Б) месторождения [3] Вернинское. Условные обозначения: 1, 2 – Вачская свита: 1 – верхняя подсвита; 2 – нижняя подсвита; 3–6 – Аунакитская свита, верхняя подсвита: 3 – четвертая пачка; 4 – третья пачка; 5 – вторая пачка; 6 – первая пачка; 7, 8 – Аунакитская свита: 7 – средняя подсвита; 8 – нижняя подсвита; 9 – контур месторождения

Fig. 1. Geographical position (A) and geological structure (B) of the deposit [3] Verninskoe. Legend: 1, 2 – Vach formation: 1 – upper subformation; 2 – lower subformation; 3–6 – Aunakit formation, upper subformation: 3 – fourth pack; 4 – third pack; 5 – second pack; 6 – first pack; 7, 8 – Aunakit formation: 7 – middle subformation; 8 – lower subformation; 9 – deposit contour

Толща сложена ритмично переслаивающимися серицит-кварцевыми песчаниками и углеродистыми филлитовидными сланцами. Среди пород толщи отмечается маркирующий горизонт, сложенный известняками. Средняя подсвита Аунакитской свиты на 60...75 % сложена филлитовидными сланцами, остальное приходится на карбонат-серицит-кварцевые и кварцитовидные песчаники [3–10]. Исходные осадочные породы подверглись процессам регионального метаморфизма и околорудного метасоматоза. В результате указанных процессов были образованы минеральные комплексы, которые, по мнению И.В. Кучеренко [3, 11–14], представлены двумя тыловыми зонами, отражающими структуру рудовмещающего метасоматического ореола, а также схему минералого-петрохимической зональности околорудных метасоматических ореолов мезотермальных золоторудных месторождений, образованных в несланцевом и черносланцевом субстрате. Ми-

неральный состав тыловой зоны отвечает составу березита, смежной – березитоида (березита с альбитом) при унаследовании метасоматитами от черного до серого цветов в результате сохранения керогена или же частичного снижения его содержания при неполном окислении [14–18].

Оруденение представлено тремя пологозалегающими зонами с прожилково-вкрапленной кварц-сульфидной минерализацией. В целом мощность минерализованной зоны составляет более 500 м при протяженности более 2 км [14]. Параметры рудных тел колеблются в широких пределах, наиболее крупное из них по протяженности составляет 730 м по простиранию и 890 м по падению при мощности от 3,8 до 59,8 м.

Вмещающие породы в результате широко проявленного в районе коллизионного процесса превращены в метаосадки. В дальнейшем в процессе гидротермально-метасоматических изменений сформиро-

вались пропилитовая и березитовая формации. Слабо проявленная пропилитовая формация охватывает самую внешнюю зону гидротермально-измененных пород месторождения. В свою очередь, березитовая формация проявлена на месторождении наиболее широко и именно к ней пространственно приурочены все рудные тела [14–20].

Рудовмещающая толща представлена в доминирующем объеме тонко-среднезернистыми, реже средне-крупнозернистыми песчаниками, в меньшем объеме отмечаются аргиллиты и алевролиты, имеющие разную степень расланцованности. Аналогично Сухому Логу, продолжение которого на юго-востоке представляет образование в схожих складчато-разломных структурах, в породах частично сохранилась обломочная фракция, представленная кварцем [14–23].

Минеральный состав алевролитов и песчаников представлен, помимо кварца, карбонатами, керогеном, серицитом, сульфидами, лейкоксеном, альбитом, при этом данные минералы содержатся в породах в переменных количествах и разных сочетаниях, часто образуя сложные сростания [12, 14, 18]. Содержание карбонатов в породах неустойчивое, может характеризоваться как их полным отсутствием, так и высоким присутствием (до 65...70 %), но обычно среднее содержание данного минерала составляет 5...20 %. По данным сканирующей электронной микроскопии карбонаты представлены анкеритом.

Результаты

В формировании руд Вернинского месторождения принимают участие минералы золото-пирит-арсенопиритовой ассоциации, которая в свою очередь контролируется зонами расланцевания на глубину 500 м и более.

Проведенными исследованиями установлено, что оруденение представлено двумя морфологическими типами: вкрапленный и прожилково-вкрапленный. Значительная часть рудной минерализации приурочена ко второму типу.

Во *вкрапленных рудах* отмечается преобладание нерудного материала, обычно занимающего до 55...75 % объема руды, над рудным (рис. 1, а, б).

Распределение минералов в руде неравномерное. В составе рудной минерализации преобладают пирит и арсенопирит, суммарно составляющие до 15...23 %, при этом обычно пирит доминирует над арсенопиритом, составляя примерно 18...20 % от общего объема руды.

Пирит характеризуется кристаллически-зернистой и тонкозернистой генерациями, при этом вторая достаточно распространена во вкрапленных рудах. Предположительно, именно данный тип сульфида имеет более раннее происхождение среди присутствующих сульфидных минералов, размеры его не превышают первых мкм.

Размер кристаллически-зернистой генерации варьирует в пределах 0,01...2,5 мм, при этом крупнозернистые фракции в рудах преобладают. Нередко встречаются дезинтегрированные индивиды с неправильной угловатой формой. Стоит отметить, что не все зерна сохранили цельный изометричный облик, в некоторых

раздробленных (катаклазированных) агрегатах по трещинам отмечается заполнение галенитом и реже сфалеритом. Диагностированы случаи образования фрамбозального пирита, обусловленного процессом собирательной кристаллизации (рис. 3, а) [24–26].

Арсенопирит является второстепенным сульфидом во вкрапленном типе руд. Отмечается в виде метакристаллов короткопризматической формы размером до 1,5 мм с хорошо выраженными гранями. Вкрапленности арсенопирита и пирита отмечаются как в свободном виде, так и в сростании друг с другом в кварце и анкерите, реже в ортоклазе [27].

Сфалерит во вкрапленных рудах обычно спорадически заполняет пустоты и трещины, как в рудных (пирит), так и в нерудных (кварц, анкерит) минералах. Выделения образуют неправильные формы (рис. 3, б).

Галенит диагностируется в данном типе руд в резко подчиненном количестве (1...3 %), при этом развит в виде разнообразных неправильных включений, заполняющих пустоты в пирите. Обычно данные агрегаты имеют соотношение длины и мощности 5:1, при этом по мощности они не превышают 1 мкм, а в длину 50 мкм.

Второстепенные минералы во вкрапленных рудах представлены рутилом TiO_2 , лейкоксеном $Fe_2Ti_3O_9$, цирконом $ZrSiO_4$ и минералами группы редкоземельных элементов (РЗЭ).

Прожилково-вкрапленные руды (рис. 2, в, г) по отношению к вкрапленным являются доминирующим типом. Прожилки сложены кварцем SiO_2 и карбонатом, по результатам сканирующей электронной микроскопии представленным анкеритом $Ca(Fe,Mg,Mn)(CO_3)_2$. Мощность изучаемых прожилков достаточно не выдержана и не превышает 2,5...3 см. Карбонат образует гнездовые скопления размером до 1 см, при этом по составу достаточно однородные. Сульфиды представлены арсенопиритом, пиритом, сфалеритом и реже халькопиритом с галенитом.

Доминирующий сульфид в данном типе руд – арсенопирит, представлен крупнозернистыми агрегатами неправильной формы со средними размерами до 11 мм в длину и 5 мм в ширину. Редко в рудах встречаются двойниковые сростания сульфида. При изучении данного типа руд отмечался катаклиз арсенопирита (рис. 2, г), выраженный в раздроблении зерен и цементации частиц кварцем [27].

Пирит обычно представлен изометричными и слабоизометричными зернами размером от 0,1 мкм до 1 мм. Часто отмечается в ассоциации с арсенопиритом (в виде включений в самом минерале). Скопление зерен этого сульфида в данном типе руд достаточно редкое явление, но имеет место быть.

Сфалерит при изучении прожилково-вкрапленных руд диагностирован в достаточно малом количестве, представлен каплевидными и прожилковидными включениями в зернах пирита, подверженных процессу катаклаза.

Халькопирит при изучении руд диагностировался единично в виде неправильных образований, заполняющих пустоты других сульфидов, чаще всего арсенопирита.

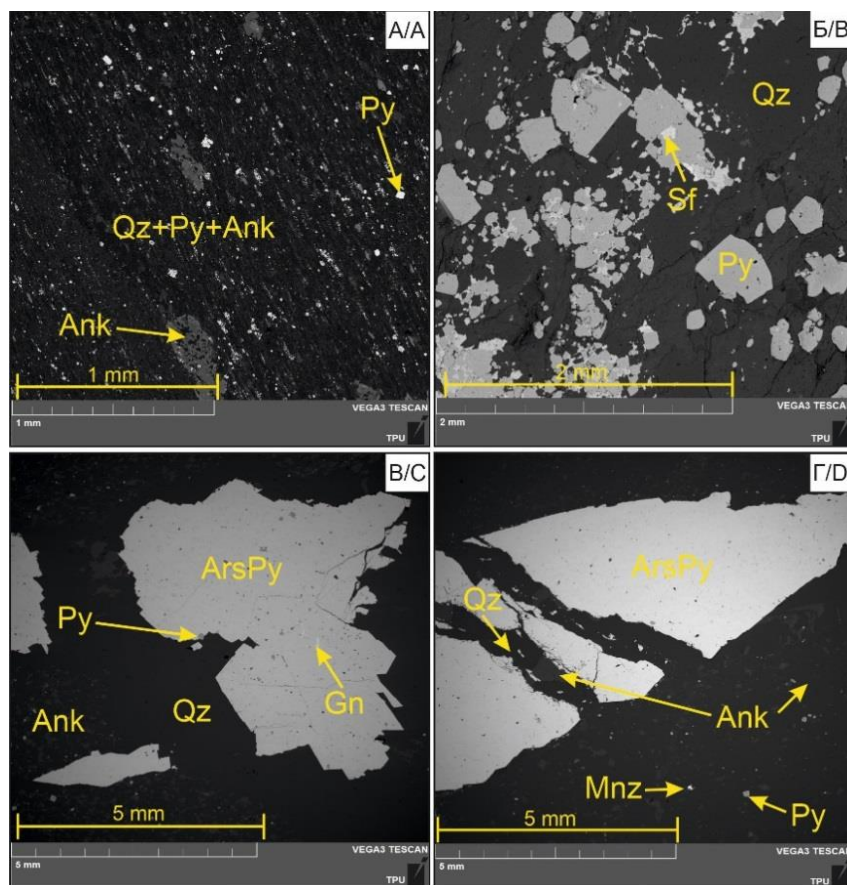


Рис. 2. Изображения сканирующего электронного микроскопа в обратно рассеянных электронах, демонстрирующие вкрапленную (А, Б) и прожилково-вкрапленную (В, Г) текстуру руд (увеличенный фрагмент прожилка). Qz – кварц, Py – пирит, Ank – анкерит, ArsPy – арсенопирит, Gn – галенит, Mnz – монацит

Fig. 2. SEM images in backscattered electrons, demonstrating disseminated (A, B) and vein-disseminated (C, D) texture of ores (enlarged veinlet fragment). Qz – quartz, Py – pyrite, Ank – ankerite, ArsPy – arsenopyrite, Gn – galena, Mnz – monazite

Аналогично вкрапленным, в прожилково-вкрапленных рудах отмечаются включения рутила TiO_2 , циркона $ZrSiO_4$, лейкоксена $Fe_2Ti_3O_9$, а также минералов группы редкоземельных элементов.

По химическому составу для пирита данных типов руд характерен состав: S – 52,47...53,01 %; Fe – 45,94...47,03 %. Из других элементов спародически отмечен в качестве примеси Ti (0,21...0,94 %), в единичном случае зафиксировано содержание As (1,2 %). В галените были встречены примеси Fe (2,77 %). Также в сфалерите единично диагностировано присутствие Fe (4,37 %).

В обоих типах руд отмечаются включения циркона $ZrSiO_4$ и рутила TiO_2 .

Циркон по своим морфологическим характеристикам представлен в преобладающем количестве неправильными зернами, реже изометричными кристаллами в виде короткостолбчатых призм с зональным строением, изредка полуразрушенными (рис. 3, в). Минерал представлен одной генерацией и отмечается в пустотах и трещинах кварца.

Для рутила в рудах характерна вытянутая призматическая, игольчатая, а также неправильная формы агрегатов (рис. 3, б, г). Последние, вероятнее всего, являются обломками кристаллов. Состав минерала:

Ti – 55...60 %; O – 40...45 %. Единоразы диагностирована примесь Ba (6,02 %). Данный минерал отмечается в трещинах и пустотах нерудных минералов: анкерита, ортоклаза и кварца. Помимо этого, в рудах диагностировались тонкоигольчатые агрегаты лейкоксена, являющиеся по своей природе продуктом изменения титанового минерала, в нашем случае рутила.

Минералы группы редкоземельных элементов (рис. 3, з-е) представлены зернами разнообразной формы выделения (округлые, амебообразные, каплевидные), по химическому составу (рис. 3, ж) сложные группой цериевых (легких) элементов: Ce, P, Nd, La, Pr, Sm и весьма редко в малом процентном количестве Ag (не более 0,1 %). Данному химическому составу соответствуют такие минералы группы РЗЭ, как монацит (Nd, Ce, La) $(P,Si)O_4$ (рис. 3, д) – минерал, относящийся к классу фосфатов лантаноидов, и рабдофан-(Ce) (Ce, La) $PO_4(H_2O)$ – минерал группы рабдофана (водных редкоземельных фосфатов). Отличительной характеристикой второго минерала является его слабо вытянутая форма с соотношением длины и ширины 2:1, где длина варьируется в пределах 5...125 мкм. Иногда данные зерна имеют слабопористую структуру (рис. 3, е), а также полуразрушены и дезинтегрированы.

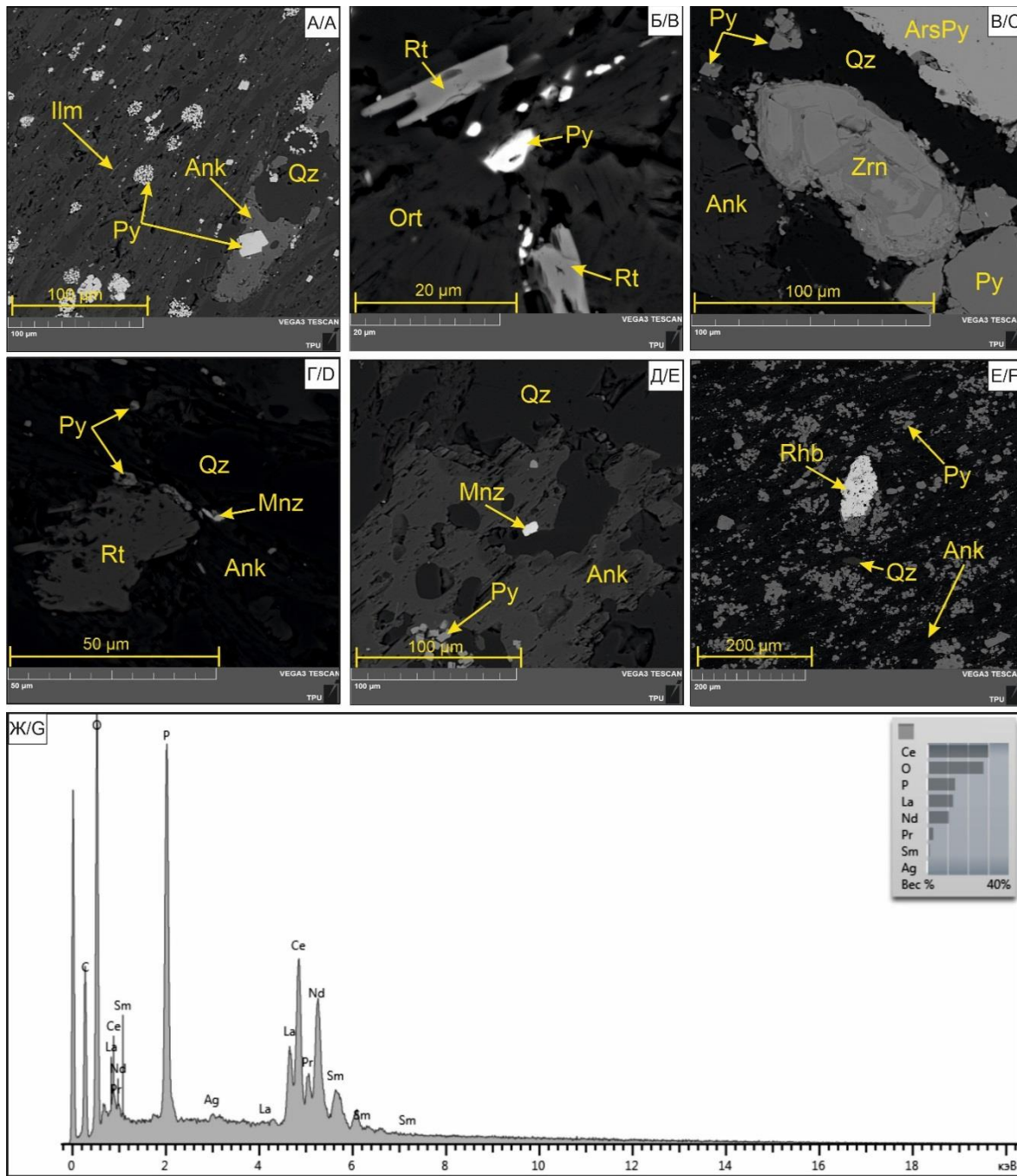


Рис. 3. Изображения сканирующего электронного микроскопа в обратно рассеянных электронах, демонстрирующие фрамбоэдальные скопления пирита (А), характерные вытянутые формы рутила (Б), зональность кристалла циркона (В), а также образование рутила неправильной формы с включениями монацита на периферии (Г), выделения монацита (Д), рабдофана-(Сс) (Е) и усредненный химический состав РЗЭ (Ж). Py – пирит, Qz – кварц, Ank – анкерит, Zrn – циркон, ArsPy – арсенипирит, Mnz – монацит, Rhb – рабдофан-(Сс), Rt – рутил, Gn – галенит, Ort – ортоклаз

Fig. 3. SEM images in backscattered electrons showing framboidal pyrite accumulations (A), characteristic elongated rutile shapes (B), zircon crystal zoning (C), and irregularly shaped rutile formation with monazite inclusions on the periphery (D), monazite exudations (E), rhabdophane-(Ce) (F), and the average chemical composition of rare earth elements (G). Py – pyrite, Qz – quartz, Ank – ankerite, Zrn – zircon, ArsPy – arsenopyrite, Mnz – monazite, Rhb – rhabdophane-(Ce), Rt – rutile, Gn – galena, Ort – orthoclase

В результате проведенного исследования было установлено, что золото в руде находится в виде самородного. При этом около 75...80 % диагностируемого золота приурочено к прожилково-вкрапленному типу. Установлено, что золото связано с сульфидами

и диагностировано преимущественно в ассоциации с арсенипиритом, пиритом и сфалеритом [28–38].

Одной из специфических особенностей самородного золота на данном месторождении является многообразие форм выделений, при этом отмечается гос-

подство в рудах золота неправильных форм, вариация которых заслуживает отдельного внимания.

Большая часть золотой минерализации приурочена к прожилково-вкрапленным рудам. При этом морфология данного самородного металла для каждого типа имеет отличительные характеристики.

Золото *прожилково-вкрапленных руд* в доминирующем количестве представлено проволочковидными формами, которые заполняют трещины арсенопирита, возникшие в результате катаклаза. Каплевидные и амeboобразные формы диагностируются в рудах намного реже.

Для *вкрапленного типа оруденения* характерно преобладание амeboобразных и каплевидных форм выделений минерала с размерностью от 1 до 55 мкм. При этом более мелкие образования доминируют в рудах и по размерам варьируют в пределах 30...40 мкм.

Для золота в рудах отмечается общая характерная черта – подчиненность полостям, существовавшим ранее, к началу или во время кристаллизации самого золота [29]. При этом генезис данных полостей и непосредственно их очертания и расположение в рудах различны. Одной из наиболее распространенных морфологических разновидностей являются гемидиоморфные частицы, которыми представлены многочисленные мельчайшие вкрапления золота в рудах.

В доминирующем количестве в рудах отмечаются трещинные проволочковидные выделения в арсено-

пирите, достаточно уплощенные и анизометричные за счет ограничения стенками самих трещин. Соотношение длины и мощности данных выделений колеблется от 1:3 до 1:25, при этом средняя мощность составляет 2 мкм. Контуры краев данных выделений обычно округлые либо извилистые, за счет неровностей стенок самих трещин. Также часто отмечается лишь частичное заполнение золотом трещин (рис. 3, в), оставляющее в них пустоты и образующее тупые, ровные и неправильные грани. Диагностированные удлиненные агрегаты золота проволочковидных форм, очевидно, имеют метасоматическое происхождение. Отличительной их характеристикой является ребристо-ямчатый рельеф поверхности [27].

Плохообразованные амeboобразные и каплевидные кристаллы диагностируются в рудах достаточно часто, при этом мелкие вкрапленности отмечаются в сульфидах. Размеры их обычно не превышают 1...55 мкм. В аншлифах данные формы золота диагностируются как в виде одиночных каплевидных и амeboобразных (рис. 4, а, б) зерен, так и в виде их скоплений и сростков. При сканировании руд отмечается, что данные агрегаты подчиняются трещинам или же интерстенциям в сульфидах, при этом наблюдается сохраненность независимости границ зерен. Что касается сульфидных минералов, чаще всего для данных форм выделения золота характерна ассоциация со сфалеритом и пиритом (рис. 4, а, з).

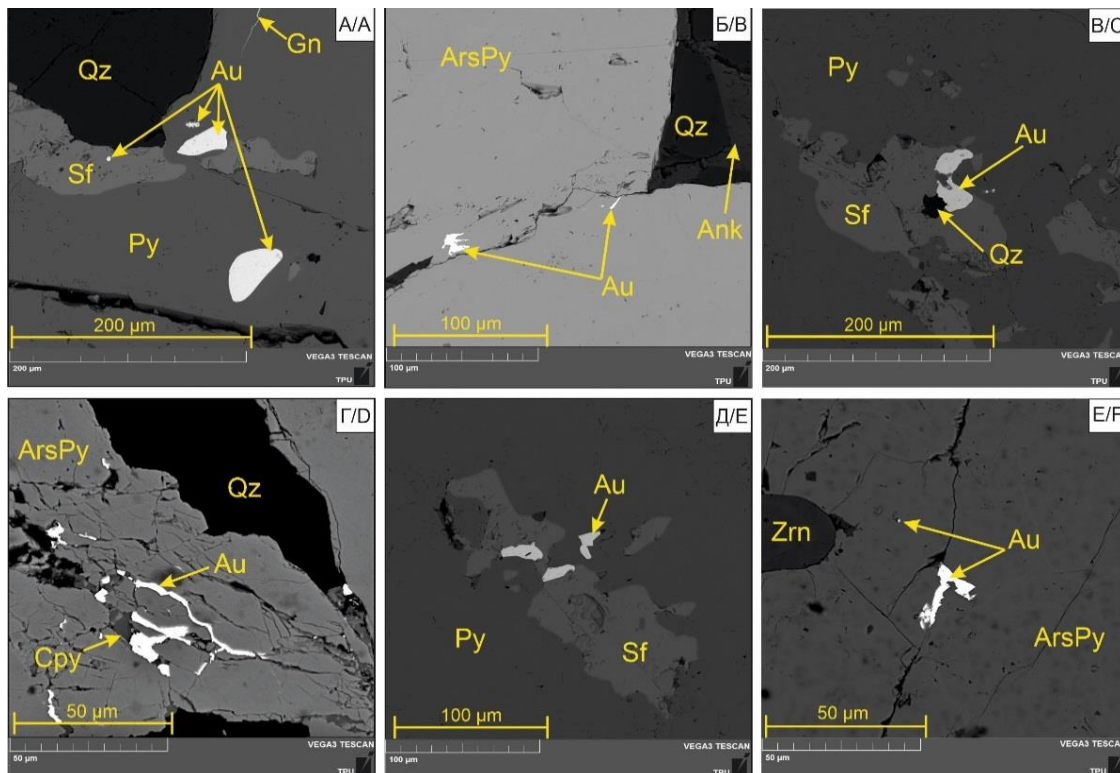


Рис. 4. Изображения сканирующего электронного микроскопа в обратно рассеянных электронах, демонстрирующие каплевидные (А), а также амeboобразные включения золота в пирите и сфалерите (В, Д) и трещинные проволочковидные (Б, Г, Е) формы распределения данного самородного металла в арсенопирите. Au – золото, Py – пирит, Qz – кварц, ArsPy – арсенопирит, Sf – сфалерит, Gn – галенит, Ank – анкерит

Fig. 4. SEM image in backscattered electrons, demonstrating drop-shaped (A), as well as amoeba-like inclusions of gold in pyrite and sphalerite (C, E) and cracked wire-like (B, D, F) forms of distribution of this native metal in arsenopyrite. Au – gold, Py – pyrite, Qz – quartz, ArsPy – arsenopyrite, Sf – sphalerite, Gn – galena, Ank – ankerite

Единично выявленные слабоокругленные формы золотин возникли исходно, вероятнее всего, по октаэдрическому габитусу в результате округления граней [29]. Обычно слабоограниченные золотишки располагаются вдоль трещин или вырастают в зерна сульфидов (арсенопирита, пирита и сфалерита). Поверхности золотин неровные, иногда мелкоячеистые. Обычно они концентрируются у границ зерен арсенопирита и пирита ранних генераций. Размер данных образований составляет 1...10 мкм.

При изучении состава золотоносных минеральных парагенезисов спорадически отмечалась примесь серебра в самородном металле, с которым золото в рудах

также образует интерметаллические соединения и твердые растворы. По результатам сканирующей электронной микроскопии среднее значение примеси серебра Ag в золоте колеблется в пределах 2,59...6,35 %. Назвать данные образования минералом электрумом (AuAg) будет неправильно из-за низкого содержания серебра, которое в данном минерале должно присутствовать в количестве 15 % и более [28, 29].

В таблице представлен усредненный состав золота в определенной ассоциации с минералами для вкрапленного и прожилково-вкрапленного типа руд. Данные получены по результатам сканирующей электронной микроскопии.

Таблица. Усредненный состав золота по данным сканирующей электронной микроскопии в каждом типе руд, мас. % [28–30]

Table. Average composition of gold according to scanning electron microscopy in each type of ores, wt. % [28–30]

В каком минерале находится золото What mineral contains gold	Компоненты (среднее значение)/Components (average)						Сумма Sum	Проба золота Gold content
	Au	Ag	Fe	Zn	As	Cu		
Прожилково-вкрапленный тип руд/Veinlet-disseminated ore type								
Арсенопирит/Arsenopyrite	90,69	6,35	–	–	2,96	–	100	935
Халькопирит/Chalcopyrite	92,71	4,92	1,55	–	–	0,56	99,74	950
Вкрапленный тип руд/Disseminated ore type								
На границе сфалерита с пиритом On the border between sphalerite and pyrite	95,61	3,71	0,07	0,61	–	–	100	963
Сфалерит/Sphalerite	93,07	5,05	1,89	–	–	–	100,1	949
Пирит/Pyrite	94,19	5,19	0,62	–	–	–	100	948
Арсенопирит/Arsenopyrite	93,7	4,34	–	–	1,86	–	99,9	956

По полученным данным, золото на месторождении является высокопробным Au_{935...963}.

По мнению многих исследователей, в их числе и Н.В. Петровская [29], в золоторудных месторождениях, как правило, присутствуют две главные генерации золота, первая из которых образует тонкодисперсную вкрапленность в сульфидной ранней ассоциации, а вторая в виде более крупных выделений сопровождается позднюю сульфидную ассоциацию. В результате коллизии процесса, протекающего на Вернинском месторождении, можно предположить, что обе генерации золота подверглись растворению и переотложению, в результате чего самородный минерал и характеризуется высокой пробой.

Обсуждение результатов

Полученные данные проведенных исследований коррелируются с данными по месторождениям-аналогам Чертово Корыто и Сухой Лог.

Золото в *Сухом Логу* встречается только во вкрапленном пирите или кварц-пирит-карбонатных жилах. Определены два генетических типа золота, различающихся по пробе. Высокопробное золото Au_{900...920} находится в виде каплеобразных частиц внутри пирита, находящегося в ассоциации с другими сульфидами и кварцем. Золото пробой Au_{840...880} было сформировано позже в виде крупных зерен в жилах и прожилках в ассоциации с пиритом. По данным гранулометрии, преобладающая часть самородного золота по своим размерам варьирует в пределах 40 мкм, остальная – менее 10 мкм. Золото ранних генераций в рудах стремится к «компактной» форме, а поздние зерна обычно вытянутые или проволочковидные, сформировавшиеся в трещинах и на контактах зерен сульфидов и кварца [33–35, 37].

На месторождении *Чертово Корыто* преобладает прожилково-вкрапленный золото-кварц-сульфидный тип минерализации. Золото представлено разными генерациями: в виде механических примесей в арсенопирите и пирите, а также включениями размером до 0,5 мм в арсенопирите. Некоторая часть золота содержит Ag и является наиболее высокопробным Au_{886,5...922,9}. Структура взаимных границ между минералами и золотом зазубренная, что свидетельствует о их одновременном выделении. По зонам катаклаза крупных кристаллов развиваются аллотриоморфные проволочковидные включения золота совместно с пиритом, реже галенитом [36, 38].

На *Вернинском месторождении* преобладает прожилково-вкрапленный золото-пирит-арсенопиритовой тип минерализации. Золото является высокопробным Au_{935...963} и представлено разнообразными формами выделения: каплевидной, амебообразной и проволочковидной. Золото каплеобразных и амебообразных форм имеет пробу Au_{936...963} и приурочено к пириту, сфалериту и арсенопириту. Размер частиц варьирует в пределах 50 мкм. Для проволочковидных форм выделения золота характерна проба Au_{935...952}. Агрегаты заполняют трещины в арсенопирите. Мощность данных выделений варьирует от 0,1 до 1 мкм, а длина до 50 мкм. Данная форма золота в рудах является доминирующей. Единично диагностированы агрегаты золота слабоокруглой формы размером менее 1 мкм.

По полученным данным отмечается достаточно большое сходство Вернинского месторождения с Чертовым Корытом. Для обоих месторождений характерно преобладание проволочковидной формы выделения золота и приуроченность его в большом количестве к арсенопириту. При этом проба золота на

Вернинском месторождении является наиболее высокой среди упомянутых месторождений.

Имеющиеся различия между данными месторождениями отмечаются за счет их принадлежности к разделенным в пределах разреза и во времени стратиграфическим единицам, сформировавшимся в различных геодинамических обстановках [38].

По полученным результатам можно сделать вывод, что все три месторождения имеют сходные процессы рудообразования, вероятно, за счет участия в одном палеозойском геодинамическом событии [37], повлекшем за собой формирование крупной Ленской золотоносной провинции, а также месторождений различных по масштабу [38].

Заключение

Руды Вернинского месторождения в основном сложены золото-пирит-арсенопиритовой минерализацией, которая контролируется зонами расланцевания на глубину 500 м и более. Вмещающие породы в результате широко проявленного в районе коллизионного процесса превращены в метаосадки. В дальнейшем в процессе гидротермально-метасоматических изменений сформировались пропилитовая и березитовая формации, ко второй из которых пространственно приурочены все рудные тела.

В ходе изучения Северной рудной зоны Вернинского месторождения по текстурно-структурным особенностям выявлены два типа руд: вкрапленный и прожилково-вкрапленный. Второй тип занимает доминирующую роль.

Нерудные минералы в рудах представлены кварцем SiO_2 , анкеритом $\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})(\text{CO}_3)_2$ и ортоклазом $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$. Рудные минералы включают в себя пирит FeS_2 , арсенопирит FeAsS , сфалерит ZnS , галенит PbS , рутил TiO_2 , циркон ZrSiO_4 , минералы группы РЗЭ и самородное золото Au . Впервые в рудах диагностированы циркон и минералы группы цериевых РЗЭ, представленные монацитом $(\text{Nd}, \text{Ce}, \text{La})(\text{P}, \text{Si})\text{O}_4$ и рабдофаном-(Ce) $(\text{Ce}, \text{La})\text{PO}_4(\text{H}_2\text{O})$.

Основу сульфидной минерализации представляет арсенопирит и пирит, в меньшей степени отмечается сфалерит, галенит и весьма редко халькопирит. Для вкрапленных руд характерно преобладание пирита, в прожилково-вкрапленных – арсенопирита.

Золото в рудах находится в самородном состоянии и парагенетически связано с сульфидными образованиями, преимущественно с прожилково-вкрапленным типом руд: в ассоциации с арсенопиритом, пиритом и в меньшей степени сфалеритом.

Для многообразных форм выделений золота на данном месторождении отмечается общая характер-

ная черта – подчиненность к полостям, существовавшим ранее, к началу или во время кристаллизации самого золота. При этом генезис данных полостей и непосредственно их очертания и расположение в рудах различны. Более распространенными морфологическими разновидностями являются аллотриоморфные частицы, которые представлены многочисленными мельчайшими вкраплениями проволочковидного, каплевидного и амебообразного золота в рудах. Размеры включений изменяются от 1 до 55 мкм.

Большая часть диагностируемого золота приурочена к прожилково-вкрапленному типу и характеризуется проволочковидными выделениями, заполняющими в свою очередь трещины катаклаза в арсенопирите. Самородные образования достаточно уплощенные за счет стенок трещин, а контуры их краев округлые либо извилистые также вследствие неровностей стенок самих трещин. Размер данных образований весьма невелик, соотношение длины и ширины варьирует от 1:2 до 1:25, где средняя длина составляет 25 мкм. Отмечаются случаи, когда длина достигала 55 мкм. Самородный металл в данном типе руд диагностируется в ассоциации с арсенопиритом. Достаточно редко отмечаются каплевидные и амебообразные формы выделения золота в пирите и спародически в сфалерите. Данные образования по своим размерам не превышают 10 мкм.

Вкрапленный тип руд характеризуется выделениями амебообразных и каплевидных форм золота, подчиненных трещинам и интервенциям в пирите и сфалерите. Размеры образований 1...50 мкм, единично выявлены золотишки размером до 55 мкм. Спародически во вкрапленных рудах выявлены слабоокруглые зерна золота, по своей природе, вероятнее всего, имеющие первоначально октаэдрический габитус. Данная форма выделения самородного металла отмечается в ассоциации с пиритом и весьма редко с арсенопиритом ранних генераций. Размер золотинок не превышает 10 мкм.

По классификации уровня пробности [29] золото относится к высокопробному ($\text{Au}_{935...963}$). Спародически диагностировались примеси серебра в самородном металле, среднее значение которого отмечалось в пределах 2,59...4,8 %.

По результатам проведенных работ отмечается схожесть в процессе рудообразования с месторождения Сухой Лог и Чертово Корыто, также входящих в состав Ленской золоторудной провинции. Данный факт объясняется тем, что месторождения участвовали в одном палеозойском геодинамическом событии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW-2023-0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района / И.К. Рундквист, В.А. Бобров, Т.Н. Смирнова, М.Ю. Смирнов, М.Ю. Данилова, А.А. Ащевлов // Геология рудных месторождений. – 1992. – Т. 34. – № 6. – С. 3–15.
2. Годовой отчет ОАО «Полус золото» за 2010 год. URL: <https://www.e-dsbsure.ru/portal/FileLoad.aspx?Fileid=249021> (дата обращения 30.09.2022).
3. Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в Вернинском золоторудном месторождении (Ленский

- район) / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 22–33.
4. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Г. Кряжев, Ю.В. Щегольков, Э.И. Алышева, С.Е. Борисовский // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50. – № 1. – С. 3–4.
5. Колмаков Ю.В., Потехина Е.В., Колмаков А.Ю. Геодинамические обстановки золотого оруденения Тонодского и Бодай-

- бинского районов (Патомское нагорье, Россия) // Вопросы естествознания. – 2016. – Т. 4. – № 12. – С. 73–80.
6. Новожилов Ю.И., Гаврилов А.М. Золото-сульфидные месторождения в углеродисто-терригенных толщах. – М.: ЦНИГРИ, 1999. – 175 с.
 7. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
 8. 40 Ar-39 Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia) / A.V. Chugaev, A.E. Budyak, Y.O. Larionova, I.V. Chernyshev, A.V. Travin, Y.I. Tarasova, B.I. Gareev, G.A. Batalin, I.V. Rassokhina, T.I. Oleinikova // Ore Geology Reviews. – 2022. – V. 144. – 104855.
 9. Geological characteristics, modes of occurrence of gold and genesis of San' guanmiao gold deposit, Shangnan, Shaanxi Province / C. Wang, R. Wang, Y. Liu, Y. Xue, X. Hu, L. Niu // Mineral Deposits. – 2021. – V. 40 (3). – P. 491–508.
 10. Harris M.K., Thayer P.A., Amidon M.B. Sedimentology and depositional environments of middle Eocene terrigenous-carbonate strata, southeastern Atlantic coastal plain, USA // Ore Geology Reviews. – 2010. – V. 108. – P. 141–161.
 11. Taylor C.D., Lear K.G., Newkirk S.R. A genetic model for the greens creek polymetallic massive sulfide deposit, Admiralty island, southeastern Alaska // US Geological Survey Professional Paper. – 2010. – V. 1763. – P. 419–429.
 12. Кучеренко И.В. Теории, гипотезы гидротермального породорудообразования и реальность: факты и аргументы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 10. – С. 99–122.
 13. Новые данные о фемофильной специализации золотоносных березитов / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 26–29.
 14. Кучеренко И.В. Петролого-геохимические свидетельства геологической однородности гидротермальных месторождений золота, образованных в черсланцевом и несланцевом субстрате // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 25–35.
 15. Сафронов Н.И., Мещеряков С.С., Иванов Н.П. Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых. – Л.: Недра, 1978. – 215 с.
 16. Deep gold mineralization features of Jiaojia metallogenic belt, Jiaodong gold Province: based on the breakthrough of 3000 m exploration drilling / X. Yu, D. Li, J. Tian, D. Yang, W. Shan, K. Geng, Y. Xiong, N. Chi, P. Wei, P. Liu // Ore Geology Reviews. – 2020. – V. 3. – P. 385–401.
 17. Geochronology, isotopic chemistry, and gold mineralization of the black slate-hosted Haoyaoerhudong gold deposit, northern North China Craton / H. Zhang, J.-C. Liu, Q. Xu, J.-Y. Wang // Ore Geology Reviews. – 2020. – V. 117. – 103315.
 18. Кучеренко И.В. Петрогеохимические особенности рудообразования в сланцевых толщах // Разведка и охрана недр. – 1986. – № 12. – С. 24–28.
 19. Surour A.A., Bakhsh R.A., El-Nisr S.A. Ore microscopic characterization of mineralized rocks at the Bi'r Tawilah gold prospect, Saudi Arabia // Ore Geology Reviews. – 2014. – V. 2. – P. 41–55.
 20. Cerda L.P., Jones C., Kisters A. The effects of fault-zone architecture, wall-rock competence and fluid pressure variations on hydrothermal veining and gold mineralization along the Sheba Fault, Barberton Greenstone Belt, South Africa // Ore Geology Reviews. – 2022. – V. 192. – P. 104554.
 21. Oxidative dissolution of hydrothermal mixed-sulphide ore: an assessment of current knowledge in relation to seafloor massive sulphide mining / E.K. Fallon, S. Petersen, R.A. Brooker, T.B. Scott // Ore Geology Reviews. – 2017. – V. 86. – P. 309–337.
 22. Кряжев С.Г. Изотопно-геохимические и генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах // Отечественная геология. – 2017. – № 1. – С. 28–38.
 23. Ma Y., Jiang S.-Y., Li H.-L. Isotope geochemistry and genesis of the Liyuan gold deposit, Shanxi, North China // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 92. – P. 129–143.
 24. Родыгина В.Г. Начала минераграфии. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – 175 с.
 25. Geology, mineralogy and pyrite trace elements constraints on gold mineralization mechanism at the giant Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula, China / Y. Wei, L. Yang, K. Qiu, S. Wang, F. Ren, Z. Dai, D. Li, W. Shan, Z. Li, J. Wang, L. Tang // Ore Geology Reviews. – 2022. – V. 148. – 104992.
 26. Пшеничкин А.Я., Гаврилов Р.Ю. Пириты западного фланга Сухоложского золоторудного поля (Ленский рудный район) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 135–143.
 27. Золотоносный арсенопирит и условия его образования на золоторудных месторождениях Олимпиада и Велуга (Енисейский край, Сибирь) / А.Д. Генкин, Ф.Е. Вагнер, Т.Л. Крылова, А.И. Цепин // Геология рудных месторождений. – 2002. – Т. 44. – № 1. – С. 59–76.
 28. Шер С.Д. Металлогения золота. – М.: Недра, 1974. – 256 с.
 29. Петровская Н.В. Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). – М.: ИИСКЛ, 1973. – 347 с.
 30. Involvement of anomalously As-Au-rich fluids in the mineralization of the Heilan'gou gold deposit, Jiaodong, China: evidence from trace element mapping and in-situ sulfur isotope composition / K. Feng, H.-R. Fan, F.-F. Hu, K.-F. Yang, X. Liu, Y.-N. Shangguan, Y.-C. Cai, P. Jiang // Journal of Asian Earth Sciences. – 2018. – V. 160. – P. 304–321.
 31. Золото в рудах золото-колчеданного месторождения Абыз (Центральный Казахстан) / А.К. Мазуров, А.Н. Николаева, М.А. Рудмин, Т.Ю. Якич, А.С. Рубан, Ш.Ж. Байболова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 78–88.
 32. The noble metal distribution in the black shales of the Degdekan gold deposit in northeast Russia / A.I. Khanchuk, L.P. Plyusnina, E.M. Nikitenko, T.V. Kurmina, N.N. Barinov // Russia Journal of Pacific Geology. – 2011. – V. 5. – № 2. – P. 89–96.
 33. Вуд Б.Л., Попов Н.П. Гигантское месторождение золота Сухой Лог (Сибирь) // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 3. – С. 315–341.
 34. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia / R.R. Large, V.V. Maslennikov, R. Francois, L.V. Danyushevsky, Chang Zhaoshan // Economic Geology. – 2007. – V. 102. – № 7. – P. 1233–1267.
 35. Age and pyrite-Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia / S. Meffre, R.R. Large, R. Scott, J. Woodhead, Z. Chang, S.E. Gilbert, L.V. Danyushevsky, V. Maslennikov, J.M. Hergt // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 2008. – V. 72. – P. 2377–2391.
 36. Вагина Е.А. Минеральные комплексы руд и генезис месторождения золота Чертово Кoryто: Патомское нагорье: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2012. – 23 с.
 37. Изотопный состав свинца по данным высокоточного MS-ICP-MS-метода и источники вещества крупномасштабного благороднометалльного месторождения Сухой Лог (Россия) / И.В. Чернышев, А.В. Чугаев, Ю.Г. Сафонов, М.Р. Сароян, М.А. Юдовская, А.В. Еремина // Геология рудных месторождений. – 2009. – Т. 51. – № 6. – С. 550–559.
 38. Тарасова Ю.И. Вещественный состав руд и пород месторождения Чертово Кoryто, Восточная Сибирь // Металлогения древних и современных океанов. – 2016. – № 1. – С. 192–196.

Поступила 05.10.2022 г.

Прошла рецензирование 08.11.2022 г.

Информация об авторах

Николаева А.Н., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального и исследовательского Томского политехнического университета.

Мазуров А.К., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 553.041:553.2

GOLD IN ORES OF THE VERNINSKOE DEPOSIT (IRKUTSK REGION)

Anastasiya N. Nikolayeva¹,
nikolaevaanas759@gmail.com

Aleksey K. Mazurov¹,
akm@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by poor knowledge of the material composition of the ores of the Verninskoe deposit. The data obtained are an important tool not only for clarifying the predictive and prospecting criteria for gold ore deposits of carbonaceous black shale strata, but also will help increase gold extraction from ore by adjusting the enrichment process scheme.

The main aim of the research is to study the mineral form of gold in ores.

The object of the research is the ores of the Northern zone of the Verninskoe deposit.

Research methods included standard petrographic and mineragraphic analyzes, as well as scanning electron microscopy.

Results. Conducted researches have established that mineralization is represented by two morphological types: disseminated and vein-disseminated. A significant part of ore mineralization is confined to the second type. It was revealed that gold is presented in the form of native gold and has a high fineness, most of it (75...80 %) is confined to the vein-disseminated type. Native gold is diagnosed mainly in association with arsenopyrite and pyrite. The variety of forms of segregations is one of the specific features of native gold at this deposit, while gold of irregular shape predominates in the ores. For the variation of the diagnosed forms, a common characteristic feature is noted – subordination to cavities that existed earlier, at the beginning or during the crystallization of gold itself. At the same time, the genesis of these cavities and their outlines and location in the ores are quite different. One of the most common morphological varieties in ores is a wire-like form, observed in cataclasis cracks in arsenopyrite; to a lesser extent, amoeba-like and tear-shaped forms are diagnosed, forming numerous tiny inclusions of gold in ores.

Key words:

Eastern Siberia, gold-sulfide geological-industrial type, carbonaceous strata, textural and structural features, sulfides, gold, mineral form.

The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSWW-2023-0010).

REFERENCES

- Rundkvist I.K., Bobrov V.A., Smirnova T.N., Smirnov M.Yu., Danilova M.Yu., Ashcheulov A.A. Stages of formation of the Bodaibo gold ore region. *Geology of ore deposits*, 1992, vol. 34, no. 6, pp. 3–15. In Rus.
- Polyus Gold Annual Report 2010*. Available at: <https://www.edisclosure.ru/portal/FileLoad.aspx?Fileid=249021> (accessed 9 September 2022).
- Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Petrological and geochemical features of near-ore metasomatism in the Verninskoe gold deposit (Lensky district). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 22–33. In Rus.
- Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shchegolkov Yu.V., Alysheva E.I., Borisovsky S.E. Ring-ore metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in the Lena gold ore region. *Geology of ore deposits*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 3–4. In Rus.
- Kolmakov Yu.V., Potekhina E.V., Kolmakov A.Yu. Geodynamic settings of gold mineralization in the Tonodsky and Bodaibo regions (Patom highlands, Russia). *Questions of natural sciences*, 2016, vol. 4, no.12, pp. 73–80. In Rus.
- Novozhilov Yu.I., Gavrilov A.M. *Zoloto-sulfidnye mestorozhdeniya v uglerodisto-terrigennykh tolshchakh* [Gold-sulfide deposits in carbonaceous-terrigenuous strata]. Moscow, TSNIGRI Publ., 1999. 175 p.
- Buryak V.A. *Metamorfizm i rudoobrazovanie* [Metamorphism and ore formation]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 256 p.
- Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Y.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Y.I., Gareev B.I., Batalin G.A., Ras-sokhina I.V., Oleinikova T.I. ⁴⁰Ar-³⁹Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia). *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 144, 104855.
- Wang C., Wang R., Liu Y., Xue Y., Hu X., Niu L. Geological characteristics, modes of occurrence of gold and genesis of San'guanmiao gold deposit, Shannan, Shaanxi Province. *Mineral Deposits*, 2021, vol. 40 (3), pp. 491–508.
- Harris M.K., Thayer P.A., Amidon M.B. Sedimentology and depositional environments of middle Eocene terrigenous-carbonate strata, southeastern Atlantic coastal plain, USA. *Ore Geology Reviews*, 1997, vol. 108, pp. 141–161.
- Taylor C.D., Lear K.G., Newkirk S.R. A genetic model for the greens creek polymetallic massive sulfide deposit, Admiralty island, southeastern Alaska. *US Geological Survey Professional Paper*, 2010, vol. 1763, pp. 419–429.
- Kucherenko I.V. Theories, hypotheses of hydrothermal rock formation and reality: facts and arguments. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 10, pp. 99–122. In Rus.
- Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. New data on the femophilic specialization of gold-bearing beresites. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2009, vol. 315, no. 1, pp. 26–29. In Rus.
- Kucherenko I.V. Petrological and geochemical evidence of the geological and genetic homogeneity of hydrothermal gold deposits formed in black shale and non-shale substrate. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2007, vol. 311, no 1, pp. 25–35. In Rus.
- Safonov N.I., Meshcheryakov S.S., Ivanov N.P. *Energiya rudoobrazovaniya i poiski poleznykh iskopayemykh* [Energy of ore formation and prospecting for minerals]. Leningrad, Nedra Publ., 1978. 215 p.
- Yu X., Li D., Tian J., Yang D., Shan W., Geng K., Xiong Y., Chi N., Wei P., Liu P. Deep gold mineralization features of Jiaojia metallogenic belt, Jiaodong gold Province: based on the breakthrough of 3000 m exploration drilling. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 3, pp. 385–401.

17. Zhang H., Liu J.-C., Xu Q., Wang J.-Y. Geochronology, isotopic chemistry, and gold mineralization of the black slate-hosted Haoyaoerhudong gold deposit, northern North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 117, 103315.
18. Kucherenko I.V. Petrogeokhimiicheskie osobennosti rudoobrazovaniya v slantsevyykh tolshchakh [Petrogeochemical features of ore formation in shale strata]. *Razvedka i okhrana nedr*, 1986, no. 12, pp. 24–28.
19. Surour A.A., Bakhsh R.A., El-Nisr S.A. Ore microscopic characterization of mineralized rocks at the Bi'r Tawilah gold prospect, Saudi Arabia. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 2, pp. 41–55.
20. Cerda L.P., Jones C., Kisters A. The effects of fault-zone architecture, wall-rock competence and fluid pressure variations on hydrothermal veining and gold mineralization along the Sheba Fault, Barberton Greenstone Belt, South Africa. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 192, 104554.
21. Fallon E.K., Petersen S., Brooker R.A., Scott T.B. Oxidative dissolution of hydrothermal mixed-sulphide ore: an assessment of current knowledge in relation to seafloor massive sulphide mining. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 86, pp. 309–337.
22. Kryazhev S.G. Izotopno-geokhimiicheskie i geneticheskie modeli zolotorudnykh mestorozhdeniy v uglerodisto-terrigennykh tolshchakh [Isotope-geochemical and genetic models of gold deposits in carbonaceous-terrigeneous strata]. *Otechestvennaya geologiya*, 2017, no. 1, pp. 28–38.
23. Ma Y., Jiang S.-Y., Li H.-L. Isotope geochemistry and genesis of the Liyuan gold deposit, Shanxi, North China. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 92, pp. 129–143.
24. Rodygina V.G. *Nachala minerografii* [Beginnings of mineralog-raphy]. Tomsk, NTL Publ., 2006. 175 p.
25. Wei Y., Yang L., Qiu K., Wang S., Ren F., Dai Z., Li D., Shan W., Li Z., Wang J., Tang L. Geology, mineralogy and pyrite trace elements constraints on gold mineralization mechanism at the giant Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula, China. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 148, 104992.
26. Pshenichkin A.Ya., Gavrilov R.Yu. Pyrites of the western flank of the Sukholozhsky gold field (Lensky ore region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 135–143. In Rus.
27. Genkin A.D., Vagner F.E., Krylova T.L., Tsepin A.I. Gold-bearing arsenopyrite and the conditions of its formation at the Olimpiada and Veduga gold deposits (Yenisei Ridge, Siberia). *Geology of ore deposits*, 2002, vol. 44, no. 1, pp. 59–76. In Rus.
28. Sher S.D. *Metallogeniya zolota* [Metallogeny of gold]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 256 p.
29. Petrovskaya N.V. *Samorodnoe zoloto (obshchaya kharakteristika, tipomorfizm, voprosy genezisa)* [Native gold (general characteristics, typomorphism, issues of genesis)]. Moscow, NShKL Publ., 1973. 347 p.
30. Feng K., Fan H.-R., Hua F.-F., Yang K.-F., Liu X., Shangguane Y.-N., Cai Y.-C., Jiang P. Involvement of anomalously As-Au-rich fluids in the mineralization of the Heilan'gou gold deposit, Jiaodong, China: evidence from trace element mapping and in-situ sulfur isotope composition. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, vol. 160, pp. 304–321.
31. Mazurov A.K., Nikolaeva A.N., Rudmin M.A., Yakiich T.Yu., Ruban A.S., Baibolova Sh.Zh. Gold in the ores of the Abyz gold-pyrite deposit (Central Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 78–88. In Rus.
32. Khanchuk A.I., Plyusnina L.P., Nikitenko E.M., Kurmina T.V., Barinov N.N. The Noble Metal Distribution in the Black Shales of the Degdekan Gold Deposit in Northeast Russia. *Russia Journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 2, pp. 89–96.
33. Wood B.L., Popov N.P. Gigantskoe mestorozhdenie zolota Sukhoy Log (Sibir) [Giant gold deposit Sukhoi Log (Siberia)]. *Geologiya i geofizika*, 2006, vol. 47, no. 3, pp. 315–341.
34. Large R.R., Maslennikov V.V., Francois R., Danyushevsky L.V., Chang Zhaoshan. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia. *Economic Geology*, 2007, vol. 102, no. 7, pp. 1233–1267.
35. Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V., Hergt J.M. Age and pyrite-Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log Sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 2008, vol. 72, pp. 2377–2391.
36. Vagina E.A. *Mineralnye komplekсы rud i genezis mestorozhdeniya zolota Chertovo Koryto: Patomskoe nagorye*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Mineral complexes of ores and the genesis of the Chertovo Koryto gold deposit: Patomskoe highland: Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2012. 23 p.
37. Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Safonov Yu.G., Saroyan M.R., Yudovskaya M.A., Eremina A.V. Isotopic composition of lead according to high-precision MC-ICP-MS-method and sources of matter of the large-scale noble metal deposit Sukhoi Log (Russia). *Geology of ore deposits*, 2009, vol. 51, no. 6, pp. 550–559. In Rus.
38. Tarasova Yu.I. Veshchestvenny sostav rud i porod mestorozhdeniya Chertovo Koryto, Vostochnaya Sibir [Material composition of ores and rocks of the Chertovo Koryto deposit, Eastern Siberia]. *Metallogeny of ancient and modern oceans*, 2016, no. 1, pp. 192–196.

Received: 5 October 2022.

Reviewed: 8 November 2022.

Information about the authors

Anastasiya N. Nikolayeva, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksey K. Mazurov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.8.023; 519.223.4

ТИПИЗАЦИЯ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА НАКОПЛЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ И ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИМ. СУХАРЕВА

Путилов Иван Сергеевич¹,
Ivan.Putilov@pnn.lukoil.com

Юрьев Александр Вячеславович¹,
Aleksandr.Yuriev@pnn.lukoil.com

Винокурова Екатерина Евгеньевна¹,
Ekaterina.Vinokurova@pnn.lukoil.com

¹ Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми,
Россия, 614015, г. Пермь, ул. Пермская, 3а.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования методов типизации пород-коллекторов при интерпретации петрофизических данных, полученных в лабораторных условиях. Типизация пород-коллекторов по структуре порового пространства является важным этапом в интерпретации петрофизических данных, полученных в лабораторных условиях, но по сложившейся практике осуществляется лишь экспертным методом, основываясь на литологическом описании образцов керн, и по зависимостям газопроницаемости от пористости.

Цель: апробация метода накопленной корреляции и индивидуальных вероятностных моделей в комплексе с данными фациального анализа для типизации терригенных пород-коллекторов по структуре порового пространства.

Объект: образцы керн из пяти скважин месторождения им. Сухарева, представленные отложениями тульского горизонта визейского яруса нижнего карбона. При проведении исследований использовалось 165 образцов керн диаметром и длиной 30 мм.

Методы: современные методы изучения фильтрационно-емкостных и литолого-петрографических свойств, методы математической статистики для анализа экспериментальных исследований.

Результаты. Показано, что при помощи индивидуальных вероятностных моделей, построенных как функции от коэффициента открытой пористости и учитывающих информацию о типе поровой структуры, литологии и фации, можно охарактеризовать изменения углов наклона и другие эффекты, выявленные на графиках накопленной корреляции во всем диапазоне расчетов. Также впервые установлено, что применение метода накопленной корреляции в комплексе с индивидуальными вероятностными моделями и данными фациального анализа позволяет с достаточно высокой степенью достоверности типизировать терригенные породы-коллекторы по структуре порового пространства. На основе проведенного линейного дискриминантного анализа была решена практическая задача разделения по типам коллектора для объекта $C_{11\text{пер}}$ месторождения им. Сухарева. Полученные результаты показывают, что использование принципа зональности при выделении коллекторов позволяет с высокой степенью точности подобрать коллекцию образцов для фильтрационных исследований, которые будут наиболее корректно отражать физико-гидродинамическую картину пласта.

Ключевые слова:

образцы стандартного размера, порода-коллектор, фильтрационно-емкостные свойства, тип коллектора, фации, индивидуальные вероятностные модели, линейно-дискриминантный анализ.

Введение

Для подсчета запасов, построения геолого-гидродинамических моделей в проектах и технологических схемах разработки месторождений важно иметь сведения о фильтрационно-емкостных свойствах (ФЕС) вмещающих пород. Их достоверность в значительной степени зависит от обеспеченности петрофизической информацией [1–4]. Существует только один прямой способ получения такой информации – лабораторные исследования керн [5, 6]. Немаловажным этапом при интерпретации петрофизических данных, полученных в лабораторных условиях, является разделение коллекторов по типам в зависимости от структуры порового пространства. В настоящее время на практике чаще всего типизация пород осуществляется экспертным методом, основываясь на литологическом описании образцов керн, и по зависимостям газопроницаемости от пористости.

Целью данной работы является апробация метода накопленной корреляции и индивидуальных вероятностных моделей в комплексе с данными фациального анализа для типизации терригенных пород по структуре порового пространства на примере объекта $C_{11\text{пер}}$ (тульские терригенные отложения визейского яруса нижнего карбона) месторождения им. Сухарева.

Материалы и методы

Месторождение им. Сухарева расположено на севере Пермского края, в 155 километрах от г. Перми, территориально юго-западнее города Березники, является крупным месторождением. В тектоническом отношении месторождение приурочено к крупному куполовидному (Зырянскому) поднятию, расположенному на юго-западе Березниковского палеовыступа центральной части Соликамской впадины во внутренней бортовой зоне Камско-Кинельской системы палеопрогибов [7–9].

Пласт $C_{1d_{тер}}$ сложен песчаниками мелкозернистыми, алевролитами разномерными и аргиллитами.

Отложения тульского горизонта визейского яруса нижнего карбона вскрыты пятью скважинами. При проведении исследований использовались 165 образцов зерна диаметром и длиной 30 мм, приуроченных к объекту $C_{1d_{тер}}$ месторождения им. Сухарева.

Образование тульских отложений происходило в прибрежно-морских (переходных) обстановках. На прибрежные обстановки осадконакопления указывают структурно-текстурные особенности пород, наличие обедненного комплекса фауны в сочетании со значительным количеством мелких растительных остатков, наличие карбонатного цемента, присутствие в породах раковин ракообразных, биотурбация отложений. Поро-

ды, слагающие разрез исследуемых отложений, можно сгруппировать в два основных фациальных комплекса: заливно-лагунного побережья (ЗЛ) и прибрежно-аккумулятивных отложений (ПАО). Фациальный комплекс заливов и лагун сложен глинисто-алевритовыми отложениями с подчиненными прослоями песчаников. Фациальный комплекс прибрежно-аккумулятивных отложений представлен мелко-среднезернистыми песчаниками с прослоями алевролитов.

На основании литолого-петрофизических исследований выборка образцов зерна, используемая в исследованиях, была разделена на несколько групп в зависимости от тех или иных признаков или свойств пород: по типу коллектора, по литологическим свойствам, по фациальному комплексу (таблица).

Таблица. Результаты лабораторных исследований основных фильтрационно-емкостных свойств и литолого-петрографического анализа

Table. Results of laboratory studies of the main reservoir properties and lithological and petrographic analysis

Параметры Options		Количество образцов, шт. Number of samples, pcs.	Пористость, % Porosity, %	t^* ; $p^{**}<$	Проницаемость, 10^{-3} мкм ² Permeability, 10^{-3} мкм ²	t^* ; $p^{**}<$
Тип коллектора Collector type	Поровый Pore	132	<u>5,29–19,24</u> 11,57	–10,75; 0,0004	<u>0,080–1455,44</u> 135,62	–2,42; 10^{-10}
	Трещинно-поровый Fissure-porous	33	<u>0,95–9,28</u> 4,75		<u>0,060–94,39</u> 15,937	
Литология Lithology	Песчаник Sandstone	77	<u>1,02–19,24</u> 12,82	–6,25; 0,08	<u>0,07–1445,44</u> 221,39	–5,29; 10^{-10}
	Алевролит, алевропесчаник, аргиллит Siltstone silty, sandstone, mudstone	88	<u>0,95–14,04</u> 7,79		<u>0,06–94,04</u> 6,84	
Фациальный комплекс Facies complex	Прибрежно-аккумулятивные отложения Coastal-accumulative deposits	44	<u>0,95–19,24</u> 13,63	–5,41; 0,02	<u>0,10–1445,44</u> 328,77	–7,68; 10^{-10}
	Заливы и лагуны Bays and lagoons	121	<u>1,02–16,52</u> 8,92		<u>0,06–1220,25</u> 29,68	

Примечание: * – критерий Стьюдента; ** – уровень статистической значимости.

Note: * – Student's criterion; ** – level of statistical significance.

По типу коллектора образцы делятся на поровые в количестве 132 и трещинно-поровые в количестве 33. Отметим, что в соответствии с литологическим описанием шлифов образцы характеризуются наличием трещин как естественного, так и техногенного происхождения, что позволило выделить трещинно-поровый тип коллектора (рис. 1).

По литологии образцы делятся на песчаник в количестве 77 и группу образцов алевролита, алевропесчаника, аргиллита в количестве 88.

По фациальным признакам образцы делятся на комплексы заливов и лагун (ЗЛ) в количестве 121 и прибрежно-аккумулятивных отложений (ПАО) в количестве 44.

Анализ ФЕС по выборкам различных групп образцов показал различия в средних значениях в зависимости от типа коллектора, литологии и фациального комплекса. При анализе использовались следующие характеристики: $K_{прг}$ – коэффициент проницаемости по газу и K_n – коэффициент открытой пористости. Сравнение средних значений групп выборок выполнено на основе t-критерия, который подтвердил статистически значимое различие для всех групп по обе-

им характеристикам (таблица). Наибольшее различие по K_n отмечено для группы «тип коллектора».

Далее были построены индивидуальные вероятностные модели (ИВМ) для порового пространства, литологии и фациального комплекса (рис. 2).

Построенные ИВМ в зависимости от изменения коэффициента открытой пористости позволяют оценить вероятность появления порового типа коллектора ($P_{пор}$), вероятность литотипа песчаника ($P_{пес}$) и вероятность фациального комплекса прибрежно-аккумулятивных отложений ($P_{пао}$). Как видно на рис. 2, $P_{пор}=0,5$ соответствует значению $K_n=6\%$, $P_{пес}=0,5$ соответствует $K_n=10,5\%$, а $P_{пао}=0,5$ соответствует $K_n=15\%$. Таким образом, через индивидуальные вероятностные модели отражается последовательное увеличивающееся влияние трех различных факторов, контролирующих увеличение значения открытой пористости. При этом мы видим различие роли каждого фактора на всем диапазоне измерения открытой пористости.

Затем было проведено сопоставление результатов определения коэффициента открытой пористости и абсолютной газопроницаемости (рис. 3) [10, 11]. Соотношение характеризуется коэффициентом детер-

минации, равным 0,52 для всех образцов. Корреляционные поля по образцам фациальных комплексов ЗЛ

и ПАО описаны зависимостями с коэффициентами детерминации 0,22 и 0,8.

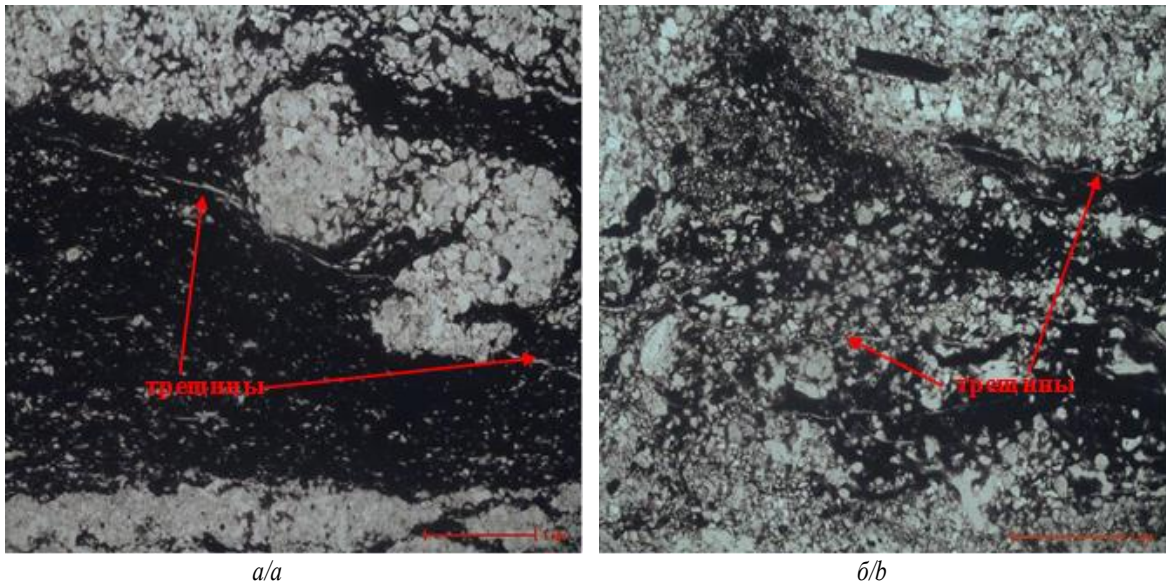


Рис. 1. (а) фотография шлифа – трещина в углистых прослойках; (б) фотография шлифа – открытые трещины по наслоению, техногенного происхождения
Fig. 1. (a) photograph of a thin section – a crack in carbonaceous interlayers; (b) photograph of a thin section – open cracks along the layering, technogenic origin

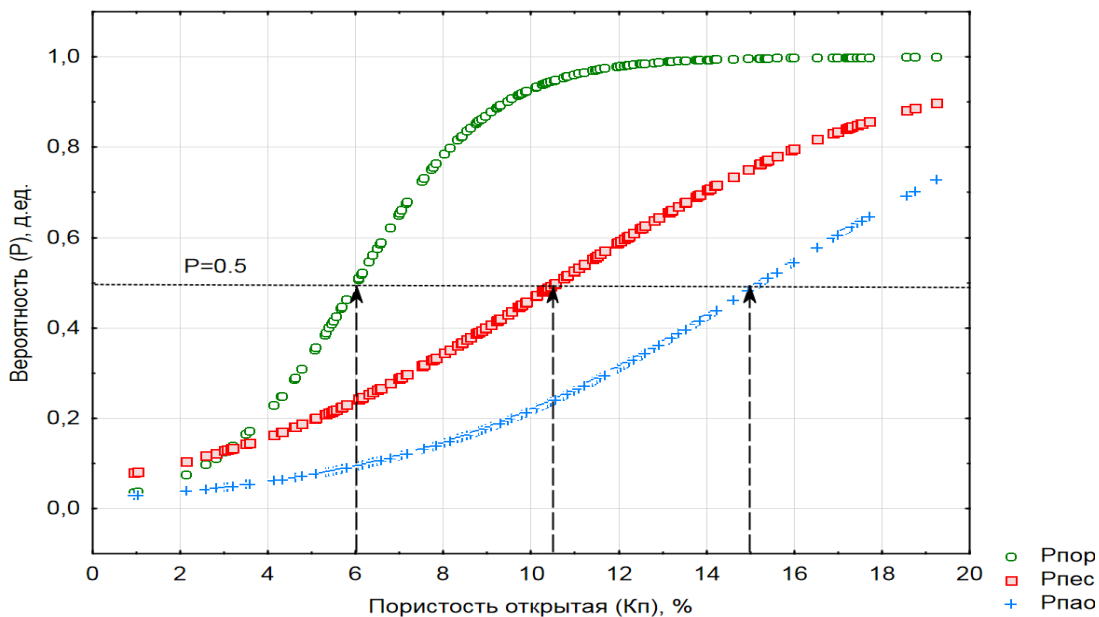


Рис. 2. Индивидуальные вероятностные модели для объекта $C_{1t1тер}$ месторождения им. Сухарева
Fig. 2. Individual probabilistic models for $C_{1t1тер}$ object of the field named after Sukharev

Полученные зависимости показывают различный характер взаимосвязи между коэффициентами открытой пористости и абсолютной газопроницаемостью в зависимости от принадлежности образцов к тому или иному фациальному комплексу. Вместе с тем основным критерием, определяющим тип коллектора, является способность породы пропускать через себя флюид, т. е. проницаемость [12, 13].

Далее на основе данных, полученных на предыдущих этапах исследования, вся выборка в зависимо-

сти от того, по каким пустотам преобладает фильтрация флюида, была разделена на два типа коллектора (рис. 4):

1. Трещинно-поровый коллектор – преобладающая роль поровых каналов в проницаемости и пористости с дополнительным увеличением проницаемости за счет микротрещиноватости.
2. Поровый коллектор – преобладающая роль открытых пор в проницаемости и пористости [1, 14].

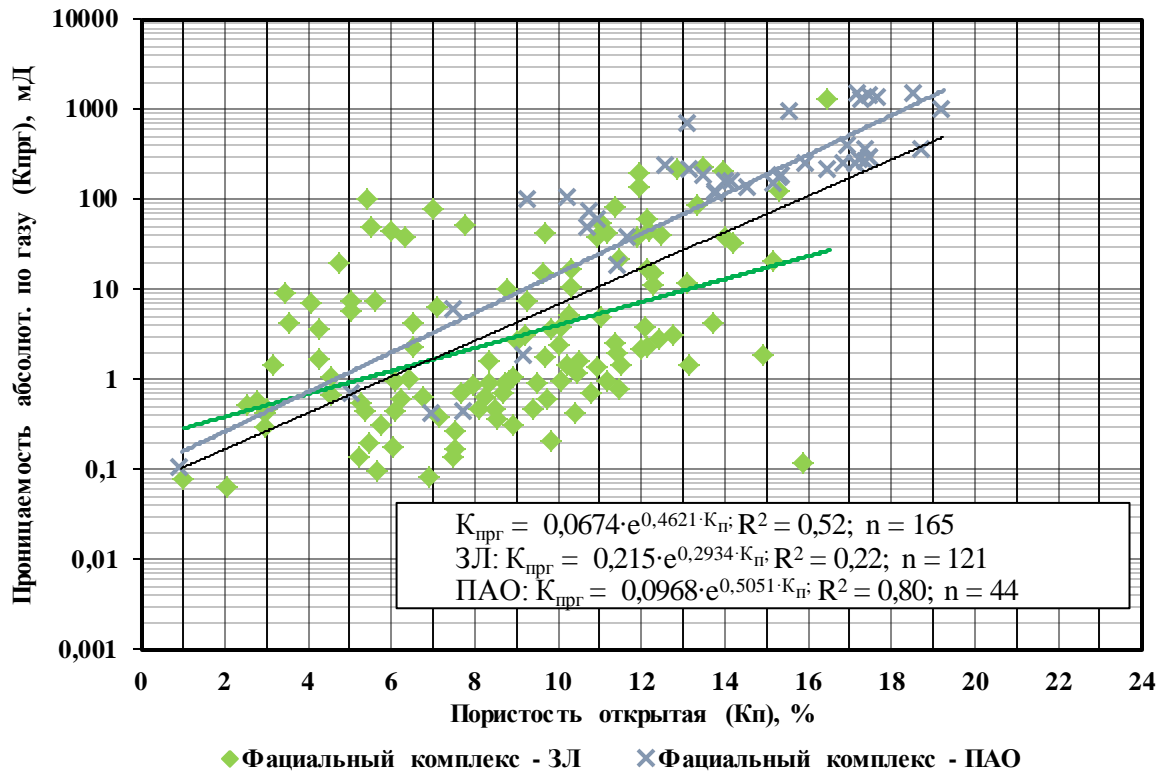


Рис. 3. Зависимость газопрооницаемости от пористости по выделенным фациальным комплексам
 Fig. 3. Gas permeability dependence on porosity for selected facies complexes

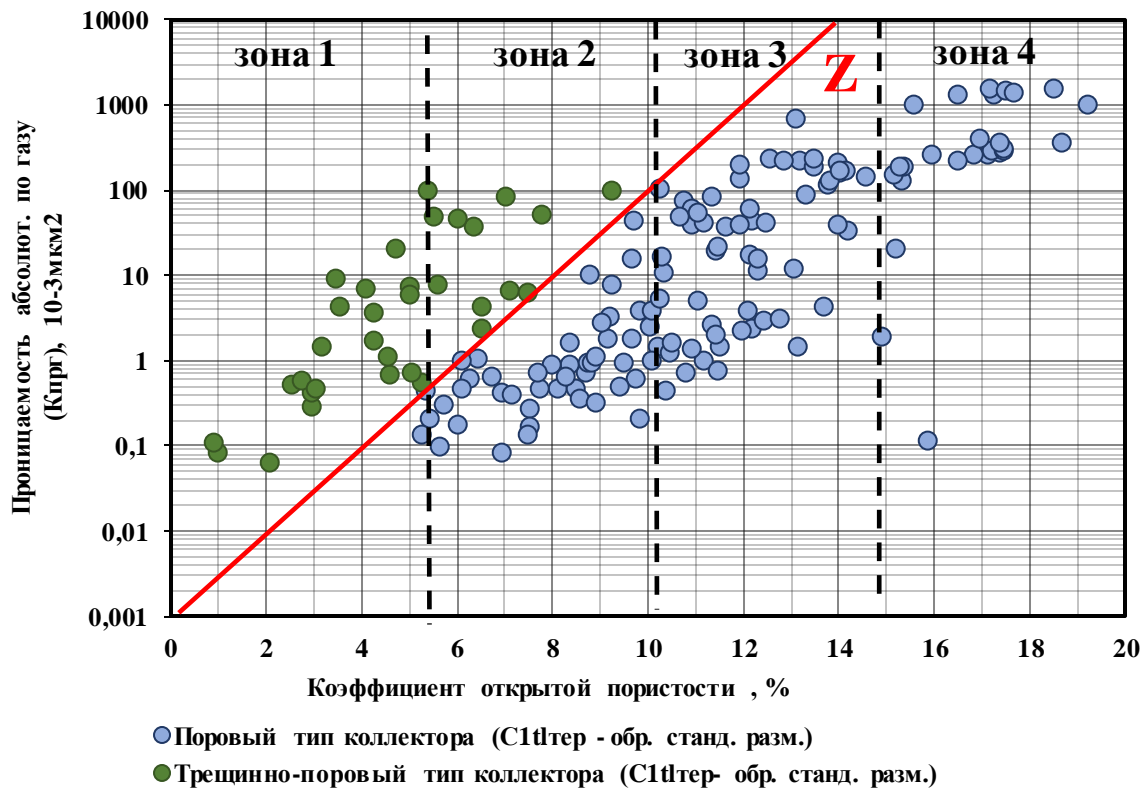


Рис. 4. Зависимость газопрооницаемости от пористости по типам коллектора
 Fig. 4. Gas permeability dependence on porosity by reservoir types

В интервалах пористости от 0 до 6 % выборка представлена только трещинно-поровым типом коллектора. В интервалах пористости от 6 до 10,5 % вы-

борка представлена как трещинно-поровым, так и поровым типами коллектора. Стоит отметить, что выборка трещинно-порового типа характеризуется более

высокими значениями коэффициента абсолютной газопроницаемости в данном интервале. После значения пористости 10,5 % представлена выборка только по поровому типу коллектора.

На основе полученных типов коллектора построена (1) линейная дискриминантная функция (ЛДФ), которая позволяет разделить пространство корреляционного поля математической моделью по всей выборке образцов на трещинно-поровый и поровый типы коллектора [15–18]. Качество классификации 92 %. Полученная ЛДФ статистически значима. ЛДФ для объекта $C_{1t_{тер}}$ месторождения им. Сухарева имеет следующий вид:

$$Z=0,548*(K_n)-1,123*(\log_{10}(K_{прг}))-4,62, \quad (1)$$

clas=92 %; $F_p/F_t=61,94$, $p<0,00001$.

Полученная ЛДФ может быть использована в будущем для классификации образцов для объекта

$C_{1t_{тер}}$ месторождения им. Сухарева, а ее статистическая значимость подтверждает экспериментальное разделение на зоны (рис. 4).

На следующем этапе исследований использовались построения накопленной корреляции, позволяющие отразить взаимосвязь между двумя или несколькими параметрами по мере увеличения объема выборки, отсортированной по одному из параметров [19].

Для исследования взаимосвязи двух переменных использовался коэффициент корреляции Пирсона (r -Пирсона) [20, 21].

При использовании данного метода была рассчитана накопленная корреляция ($r(n)$) между коэффициентом открытой пористости и коэффициентом газопроницаемости (рис. 5), отсортированная по всей выборке образцов по K_n .

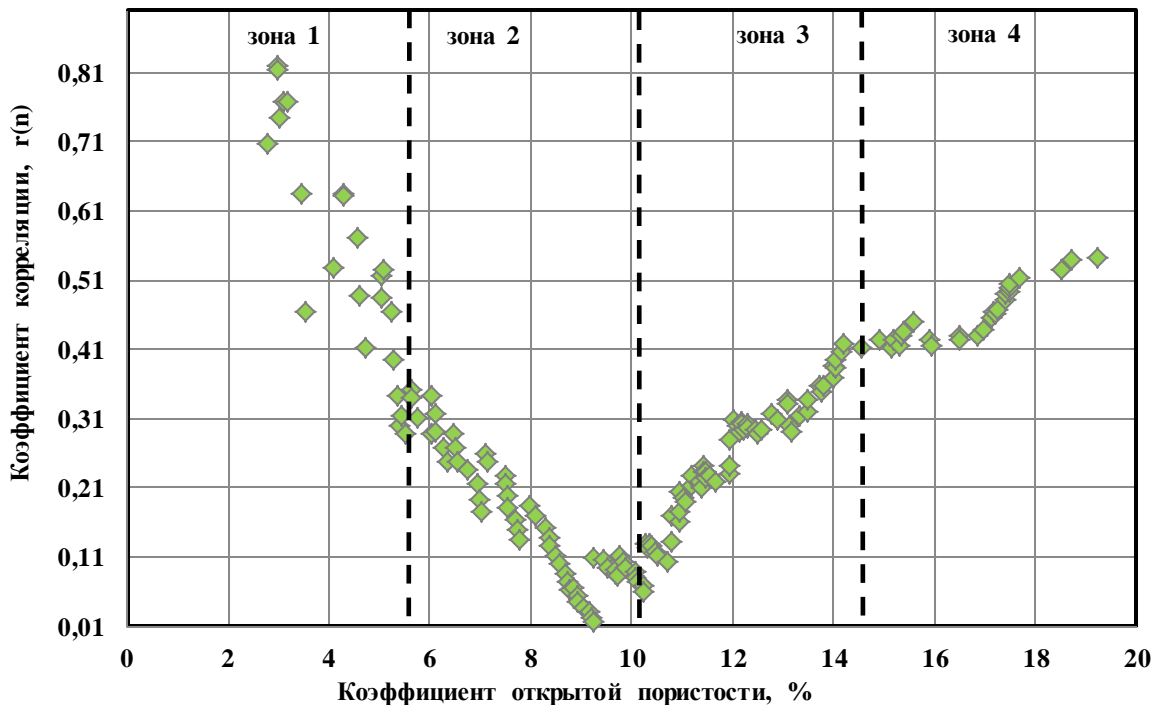


Рис. 5. График изменения коэффициента корреляции от коэффициента открытой пористости
 Fig. 5. Graph of the change in the correlation coefficient from the coefficient of open porosity

График накопленной корреляции специфически характеризует взаимосвязь коэффициента открытой пористости и газопроницаемости в разных диапазонах пористости. Разрывы, перерывы и кривизна на графиках отражают изменение структуры порового пространства в разных диапазонах [20, 21].

Как видно из рис. 5, в диапазоне открытой пористости от 2 до 6 % (зона 1) наблюдается разброс точек и снижение $r(n)$ с увеличением K_n . После 6 % значения пористости, согласно $P_{пор}>0,5$, начинает превалировать поровый тип коллектора. Изменения связаны с изменением свойств и типов породы в пределах диапазона коэффициента открытой пористости. Повышенные значения коэффициента проницаемости в данной зоне обусловлены наличием микротрещин,

что согласуется с литолого-петрографическими исследованиями данных отложений (рис. 1). В данном диапазоне вероятность порового коллектора сведена к минимуму и преобладает трещинно-поровый тип коллектора. Вероятность появления «чистого песчаника» и фациального комплекса ПАО минимальна по $P_{пес}$.

Далее можно выделить зону 2, охарактеризованную фациальными комплексами ПАО и ЗЛ. В данной зоне можно наблюдать стабилизацию накопленной корреляции. При рассмотрении $P_{пор}$ стоит отметить увеличивающуюся вероятность появления порового типа коллектора. При значении пористости больше 10,5 % вероятность появления «чистого песчаника» больше 0,5.

При значении коэффициента открытой пористости 9 % наблюдается разрыв значений $\tau(n)$ и можно наблюдать начало их роста с увеличением K_n . Все эти эффекты связаны с тем, что роль трещин в эффективном пустотном пространстве сводится к минимуму и проявляется специфический характер фильтрации для литотипов «чистого песчаника». По излому графика накопленной корреляции (рис. 5) можно четко выделить зону 3. В пределах зоны 3 отмечается резкий подъем и незначительное выполаживание графика накопленной корреляции, обусловленное участием в большей степени открытых пор в пустотном пространстве. По $P_{пор}$ можно сказать о том, что вероятность порового типа коллектора значительно увеличивается, а по $P_{пес}$ наблюдается плавный рост вероятности «чистого песчаника».

Зону 4 можно выделить по $P_{пао} > 0,5$. Вероятность порового типа коллектора максимальна и наблюдается увеличение значений $P_{пес}$ до 0,9.

Накопленные корреляции и индивидуальные вероятностные модели сами по себе являются информативными инструментами для анализа и типизации взаимосвязи структуры порового пространства с фациальными комплексами, литотипами и типами пустотного пространства. Совместное использование этих инструментов дополняет и усиливает их аналитическую значимость и информативность. Стоит отметить, что графики накопленной корреляции позволяют уточнить границы ранее выделяемых зон, кроме того, разделить их на «подзоны» для более детального рассмотрения. При этом из выше приведенного анализа очевидна взаимосвязь накопленных значений корреляции $\tau(n)$ и построенных по различным геологическим факторам индивидуальных вероятностных моделей $P_{пес}=f(K_n)$, $P_{пао}=f(K_n)$ и $P_{пор}=f(K_n)$. Для количественного описания этой взаимосвязи применен множественный регрессионный анализ. Впервые получено статистически значимое уравнение множественной корреляционной связи (2):

$$\tau(n) = -1,526 * P_{пор} + 2,672 * P_{пес} - 1,313 * P_{пао} + 0,572; \quad (2)$$
$$R = 0,97, \quad p < 10^{-5} \quad F_r/F_l = 223,4.$$

Уравнение (2) характеризуется высоким и статистически значимым коэффициентом множественной корреляции – 0,97. Впервые показано, что при помощи ИВМ, построенных как функции от K_n и учитывающих информацию о типе поровой структуры, литологии и фации, можно охарактеризовать изменения углов наклона и другие эффекты, выявленные на графиках накопленной корреляции во всем диапазоне расчетов. Таким образом, информация, которую обеспечивает $K_{прг}$ при расчете $\tau(n)$, практически пол-

ностью восстанавливается за счет учета геологических характеристик породы, выраженных через $P_{пес}=f(K_n)$, $P_{пао}=f(K_n)$ и $P_{пор}=f(K_n)$. Все это наглядно показывает, что изменение $K_{прг}$ в терригенных отложениях в значительной степени контролируется типом породы, литологией и принадлежностью к фациальному комплексу.

В целом можно сказать, что применение ИВМ в комплексе с фациальным анализом на графике накопленной корреляции для отдельных параметров четко характеризует и выделяет границы разделения по типам коллектора в представленном разрезе. Данный эффект установлен впервые. Однако необходимо подчеркнуть, что применение результатов фациального анализа в комплексе с другими методами для выделения коллекторов требует дальнейших исследований и научной проработки.

Таким образом, используя предложенный подход, можно с достаточной степенью достоверности типизировать породы тульских отложений месторождения им. Сухарева.

Заключение

В результате выполненных исследований было научно обосновано применение метода накопленной корреляции для типизации терригенных пород-коллекторов по структуре порового пространства.

Впервые показано, что при помощи индивидуальных вероятностных моделей, построенных как функции от коэффициента открытой пористости и учитывающих информацию о типе поровой структуры, литологии и фации, можно охарактеризовать изменения углов наклона и другие эффекты, выявленные на графиках накопленной корреляции во всем диапазоне расчетов.

Установлено, что применение метода накопленной корреляции в комплексе с индивидуальными вероятностными моделями и данными фациального анализа позволяет с достаточно высокой степенью достоверности типизировать терригенные породы-коллекторы по структуре пустотного пространства.

На основе проведенного линейного дискриминантного анализа была решена практическая задача разделения по типам коллектора для объекта $C_{14}T_{пр}$ месторождения им. Сухарева.

Использование принципа зональности при выделении коллекторов позволяет наиболее точно подобрать коллекцию образцов для фильтрационных исследований, которые будут наиболее корректно отражать физико-гидродинамическую картину пласта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурбатова И.П., Мелехин С.В., Юрьев А.В. Особенности изучения петрофизических и упругих свойств керна в сложнопостроенных коллекторах нефти и газа при моделировании термобарических пластовых условий // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 5. – С. 67–72. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.3.2
2. Костин Н.Г., Губайдуллин М.Г. Влияние размеров исследуемых образцов керна на величину коэффициента пористости карбонатных и терригенных коллекторов // Геологические
3. Петерсилье В.И., Рабиц Э.Г., Белов Ю.Я. Методы и аппаратура для изучения фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов на образцах большого размера. – М.: Недра, 1980. – 53 с.
4. Anderson M.A., Brent D., McLin R. Core truth in formation evaluation // Oilfield Review. – 2013. – V. 2. – P. 16–25.
5. Алексин Г.А., Клещев А.А., Россихин Ю.А. Перспективы поисков нефти и газа на севере Тимано-Печорской провинции. – М.: ВНИИОЭНГ, 1982. – 44 с.

6. Глушков Д.В., Попов Н.А., Родионова А.Л. Современные технологии профильных исследований керна и интерпретация результатов исследований // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 5. – С. 73–78.
7. Галкин В.И., Пономарев И.Н., Мартюшев Д.А. Прогноз пластового давления и исследование его поведения при разработке нефтяных месторождений на основе построения многоуровневых многомерных вероятностно-статистических моделей // Георесурсы. – 2021. – Т. 23 (3). – С. 73–82. DOI: 18599/grs.2021.3.10
8. Желанов А.В., Чалова П.О. Разработка математической модели прогноза времени восстановления давления в скважине, остановленной на исследование (на примере месторождения им. Сухарева) // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции. – Пермь, 2019. – Т. 1. – С. 133–135.
9. Плюнин А.В., Карасева Т.В. Характеристика коллекторов фаменских отложений Соликамской впадины // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. – 2015. – № 2 (27). – С. 85–92. DOI: 10.17072/psu.geol.27.85
10. Повышение достоверности результатов физико-гидродинамических исследований / И.С. Путилов, И.П. Гурбатов, Н.А. Попов, Д.Б. Чижов, А.В. Юрьев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т. 19. – № 3. – С. 219–232. DOI: 10.1559/3/2224-9923/2019.3.2.
11. Scale effect on the reservoir permeability and porosity over a wide range of void structure (example of the Tedinskoye oil field) / I. Putilov, A. Yuriev, N. Popov, D. Chizhov // Arctic Environmental Research. – 2019. – V. 19. – № 3. – P. 93–98. DOI: 10.3897/issn2541-8416.2019.19.3.93.
12. Гудок Н.С., Богданович Н.Н., Мартынов В.Г. Определение физических свойств нефтеводосодержащих пород. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 592 с.
13. Rabbani A., Babaei M., Javadpour F. A Triple Pore Network Model (T-PNM) for gas flow simulation in fractured, micro-porous and meso-porous media. *Transp Porous Med.* – 2020. – V. 132. – P. 707–740. DOI: 10.1007/s11242-020-01409-w.
14. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов объемными методами / под ред. В.И. Петерилье, В.И. Пороскуна, Г.Г. Яценко. – М.; Т: ВНИГНИ, НПЦ «Тверьгеофизика», 2003. – 130 с.
15. Johnson N.L., Leone F.C. *Statistics and experimental design.* – New York; London; Sydney; Toronto: John Wiley & Sons, 1977. – 606 p.
16. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to liner regression analysis.* – New York: John Wiley & Sons, 1982. – 504 p.
17. Watson G.S. *Statistic on spheres.* – New York: John Wiley and Sons, Inc., 1983. – 238 p.
18. Yarus J.M. *Stochastic modeling and geostatistics.* – Tulsa, Oklahoma: John Wiley & Sons, 1994. – 231 p.
19. Чекрыгин И.И., Фараонов А.А. Статистический анализ геофизических сигналов с использованием параллельный вычислений // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2019. – Т. 27. – № 2. – С. 74–94.
20. Pearson K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space // *Philosophical Magazine.* – 1901. – Ser .6. – V. 2. – № 11. – P. 559–572.
21. Kork J.O. Examination of the Chayes-Kruskal procedure for testing correlations between proportions // *Journal of the International Association for Mathematical Geology.* – 1977. – V. 9. – № 6. – P. 543–562.

Поступила 03.08.2022 г.

Прошла рецензирование 13.10.2022 г.

Информация об авторах

Путилов И.С., доктор технических наук, доцент, заместитель директора филиала по научной работе в области геологии Филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

Юрьев А.В., кандидат технических наук, ведущий инженер управления проектного и технологического сопровождения лабораторных исследований центра исследования керна и пластовых флюидов Филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

Винокурова Е.Е., начальник отдела литолого-седиментологических исследований управления комплексных исследований керна центра исследования керна и пластовых флюидов Филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

UDC 550.8.023; 519.223.4

TYPING OF TERRIGENOUS RESERVOIR ROCKS USING THE CUMULATED CORRELATION METHOD AND INDIVIDUAL PROBABILISTIC MODELS ON THE EXAMPLE OF FIELD NAMED AFTER SUKHAREV

Ivan S. Putilov¹,
Ivan.Putilov@pnn.lukoil.com

Aleksandr V. Yuriev¹,
Aleksandr.Yuriev@pnn.lukoil.com

Ekaterina E. Vinokurova¹,
Ekaterina.Vinokurova@pnn.lukoil.com

¹ Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPIneft in Perm,
3a, Permskaya street, Perm, 614015, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to improve the methods of typing reservoir rocks in interpretation of petrophysical data obtained in the laboratory. Typing of the reservoir rocks according to the structure of the pore space is an important step in the interpretation of petrophysical data obtained in the laboratory, but according to established practice, it is carried out only by an expert method, based on the lithological description of core samples and on the dependences of gas permeability on porosity.

Purpose: approbation of the accumulated correlation method and individual probabilistic models in combination with facies analysis data for typing terrigenous reservoir rocks according to the structure of the pore space.

Object: core samples from five wells of the field named after Sukharev, represented by deposits of the Tula horizon of the Visean stage of the Lower Carboniferous. When conducting research, 165 core samples were used, with a diameter and length of 30 mm.

Methods: modern methods for studying porosity-permeability and lithological-petrographic properties, methods of mathematical statistics for the analysis of experimental studies.

Results. It is shown that with the help of individual probabilistic models built as a function of the open porosity coefficient and taking into account information about the type of pore structure, lithology and facies, it is possible to characterize changes in dip angles and other effects identified on the graphs of the accumulated correlation in the entire range of calculations. It was established as well that the use of the accumulated correlation method in combination with individual probabilistic models and facies analysis data makes it possible to typing terrigenous reservoir rocks according to the structure of the pore space with a sufficiently high degree of reliability. On the basis of the linear discriminant analysis carried out, the practical problem of separation by reservoir type was solved for the C1_{16er} object of the field named after Sukharev. The obtained results show that the use of the principle of zoning when identifying reservoirs allows, with a high degree of accuracy, selecting a collection of samples for filtration studies that will most correctly reflect the physical and hydrodynamic picture of the reservoir.

Key words:

samples of standard size, reservoir rock, reservoir properties, reservoir type, facies, individual probabilistic models, linear discriminant analysis.

REFERENCES

1. Putilov I.S., Gurbatova I.P., Popov N.A., Chizhov D.B., Yuriev A.V. Increasing the reliability of results of physical and hydrodynamic tests. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 216–227. In Rus. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.3.2
2. Kostin N.G., Gubaidullin M.G. Vliyaniye razmerov issleduemyykh obraztsov kerna na velichinu koeffitsienta poristosti karbonatnykh i terrigenykh kollektorov [Influence of the sizes of the studied core samples on the value of the porosity coefficient of carbonate and terrigenous reservoirs]. *Geologicheskie opasnosti. Materialy XV Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Geological hazards. Materials of the XV All-Russian conference with international participation]. Arkhangelsk, 2009. pp. 248–250.
3. Petersile V.I., Rabits E.G., Belov Yu.Ya. *Metody i apparatura dlya izucheniya filtratsionno-emkostnykh svoystv porod-kollektorov na obraztsakh bolshogo razmera* [Methods and equipment for studying the reservoir properties of reservoir rocks on large samples]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 53 p.
4. Anderson M. A., Brent D., McLin R. Core truth in formation evaluation. *Oilfield Review*. *Oilfield Review*, 2013, vol. 2, pp. 16–25.
5. Aleksin G. A., Kleshchev A. A., Rossikhin Yu. A. *Perspektivy poiskov nefi i gaza na severe Timano-Pechorskoy provintsii* [Prospects for prospecting for oil and gas in the north of the Timan-Pechora province]. Moscow, VNIIOENG Publ., 1982. 44 p.
6. Glushkov D.V., Popov N.A., Rodionova A.L. Modern technologies of core research and interpretation of research results. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2010, no. 5, pp. 73–78. In Rus.
7. Galkin V.I., Ponomareva I.N., Martyshev D.A. Forecast of reservoir pressure and study of its behavior in the development of oil fields based on the construction of multilevel multidimensional probabilistic-statistical models. *Georesources*, 2021, no. 23 (3), pp. 73–82. In Rus. DOI: 10.18599/grs.2021.3.10
8. Zhelanov A.V., Chalova P.O. Razrabotka matematicheskoy modeli prognoza vremeni vosstanovleniya davleniya v skvazhine, ostanovlennoy na issledovanie (na primere mestorozhdeniya im. Suhareva) [Development of a mathematical model for predicting the time of pressure recovery in a well stopped for research (on the example of the Sukharev field)]. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh. Materialy XII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Materials of the XII All-Russian Scientific and Technical Conference]. 2019, vol. 1, pp. 133–135.
9. Plyusnin A.V., Karaseva T.V. Reservoir characteristic of Famennian deposits of the Solikamsk depression. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology*, 2015, no. 2 (27), pp. 85–92. In Rus. DOI: 10.17072/psu.geol.27.85
10. Putilov I.S., Gurbatova I.P., Popov N.A., Chizhov D.B., Yuriev A.V. Increasing the reliability of results of physical and hydrodynamic tests. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*

- neering, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 216–227. In Rus. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.3.2
11. Putilov I., Yuriev A., Popov N., Chizhov D. Scale effect on the reservoir permeability and porosity over a wide range of void structure (example of the Tedinskoe oil field). *Arctic Environmental Research*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 93–98. In Rus. DOI: 10.3897/issn2541-8416.2019.19.3.93
 12. Gudok N.S., Bogdanovich N.N., Martynov V.G. *Opredeleenie fizicheskikh svoystv neftevodosoderzhashchikh porod* [Determination of the physical properties of oil-bearing rocks: Textbook for universities]. Moscow, Nedra, Business Center LLC Publ., 2007. 592 p.
 13. Rabbani A., Babaei M., Javadpour F. A Triple Pore Network Model (T-PNM) for gas flow simulation in fractured, microporous and meso-porous media. *Transp Porous Med*, 2020, vol. 132, pp. 707–740. DOI: 10.1007/s11242-020-01409-w
 14. *Metodicheskie rekomendatsii po podschetu geologicheskikh zapasov obemnymi metodami* [Guidelines for the calculation of geological reserves by volumetric methods]. Eds. V.I. Petersilie, V.I. Poroskuna, G.G. Yatsenko. Moscow, Tver, VNIGNI, SPC «Tver-geofizika» Publ., 2003. 130 p.
 15. Johnson N.L., Leone F.C. *Statistics and experimental design*. New York, London, Sydney, Toronto, John Wiley & Sons, 1977. 606 p.
 16. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to liner regression analysis*. New York, John Wiley & Sons, 1982. 504 p.
 17. Watson G.S. *Statistic on spheres*. New York, John Wiley and Sons, Inc., 1983. 238 p.
 18. Yarus J.M. *Stochastic modeling and geostatistics*. Tulsa, Oklahoma, John Wiley & Sons, 1994. 231 p.
 19. Chekrygin I.I., Faraonov A.A. Statisticheskii analiz geofizicheskikh signalov s ispolzovaniem paralelnykh vychisleniy [Statistical analysis of geophysical signals using parallel computing]. *Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2019, vol. 27, no. 2, pp. 74–94.
 20. Pearson K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine*, 1901, Ser. 6, vol. 2, no. 11, pp. 559–572.
 21. Kork J.O. Examination of the Chayes-Kruskal procedure for testing correlations between proportions. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 1977, vol. 9, no. 6, pp. 543–562.

*Received: 3 August 2022.
Reviewed: 13 October 2022.*

Information about the authors

Ivan S. Putilov, Dr. Sc., associate professor, deputy director, branch for scientific work in the field of geology of the Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPIneft in Perm.

Aleksandr V. Yuriev, Cand. Sc., leading engineer Center for Research of Core and Reservoir Fluids of the Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPIneft in Perm.

Ekaterina E. Vinokurova, head of the Department of Lithological and Sedimentological Research of the Integrated Core Research Department of the Center for Core and Reservoir Fluid Research of the Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPIneft in Perm.

УДК 504.055

МНОГОЛЕТНИЙ МОНИТОРИНГ МОЩНОСТИ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА ЗОНЫ НАБЛЮДЕНИЯ РОСТОВСКОЙ АЭС

Бураева Елена Анатольевна¹,
buraeva@sfedu.ru

Иванков Дмитрий Васильевич¹,
ivankov@sfedu.ru

Маломыжева Наталья Викторовна¹,
lila.2013@yandex.ru

Бобылев Вячеслав Александрович¹,
slava_bobelev@mail.ru

Безуглова Ольга Степановна¹,
osbesuglova@sfedu.ru

¹ Южный федеральный университет,
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью непрерывного и независимого мониторинга зоны наблюдения Ростовской АЭС. В России атомная промышленность постоянно развивается, и исследования, связанные с изучением радиационной обстановки на территориях, расположенных в непосредственной близости от предприятий ядерного-топливного цикла, становятся обязательными.

Цель: оценка особенностей распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на контрольных участках зоны наблюдения Ростовской АЭС.

Объекты: территория, расположенная в 30-километровой зоне наблюдения Ростовской АЭС.

Методы: дозиметрический контроль приземного слоя воздуха методом пешеходной гамма-съемки по всему контрольному участку с помощью поисковых дозиметров-радиометров; отбор поверхностных проб почв методом конверта (со стороны квадрата 10 м) из прикопок глубиной 10 см; инструментальный гамма-спектрометрический метод радионуклидного анализа проб почв.

Результаты. Представлены данные о результатах многолетнего (2000–2021 гг.) исследования мощности эквивалентной дозы гамма-излучения и удельной активности естественных радионуклидов и искусственного радиоцезия в зоне размещения Ростовской АЭС. Исследования проводились на контрольных участках, заложенных в рамках предупредительного мониторинга данного объекта (определение так называемого «нулевого фона»). Показано, что в среднем гамма-фон варьирует в пределах 0,10–0,14 мкЗв/ч, не превышает результатов предупредительного мониторинга зоны наблюдения Ростовской АЭС и зависит от радионуклидного состава почвенного покрова. Средние арифметические удельные активности радионуклидов в почвах варьируют в пределах: 10,4–23,3, 14,7–25,5, 16,0–32,6 и 319,4–575,5 для ¹³⁷Cs, ²²⁶Ra, ²³²Th и ⁴⁰K, соответственно. В целом деятельность Ростовской АЭС не оказывает влияния на радиационную обстановку на территории исследования.

Ключевые слова:

распределение, мощность эквивалентной дозы гамма-излучения, АЭС, мониторинг, радиация.

Введение

Атомные электростанции (АЭС) в настоящее время являются безопасными и экологически чистыми источниками электроэнергии, естественно, при соблюдении всех действующих правил и норм эксплуатации. В Российской Федерации расположено 10 действующих АЭС, среди которых и Ростовская (ранее Волгодонская). Мониторинг радиационной обстановки в зоне влияния АЭС необходим не только для контроля безопасности данного объекта, но и для информирования населения с целью снижения социальной напряженности.

Одним из параметров, определяющих радиационную обстановку в пределах санитарно-защитных зон и зон наблюдения предприятия ядерной топливной энергетики (ЯТЭ), является мощность эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч), или гамма-фон. МЭД на предприятиях ЯТЭ контролируется как вну-

ренными службами, так и при помощи автоматизированных систем (АСКРО). Результаты такого контроля радиационной обстановки на территории Российской Федерации представлены в онлайн-режиме [1], а также вместе с оценками концентраций радионуклидов в объектах экосферы в различных отчетах [2, 3].

Помимо официальных отчетов, радиационному контролю в санитарно-защитных зонах и в зонах наблюдения предприятий ядерного топливного цикла на территории Российской Федерации и других государств посвящено множество независимых исследований. Они охватывают исследования донных отложений и подземных вод [4–10], водоемов охладителей [11–14], флоры и фауны водоемов охладителей [15–18], объемной активности ¹³⁷Cs и ⁶⁰Co в приземном слое воздуха [19], в прибрежных отложениях [20, 21], а также наземной экосистемы, где удельная активность ¹³⁷Cs в почве варьируется в широких пре-

делах от 7,5 до 92,3 Бк/кг и среднее значение МЭД гамма-излучения не превышает 0,15 мкЗв/ч [22–29]. Ряд исследований посвящены изучению радиационной обстановки на территориях после аварий на АЭС [30–36]. На Ростовской АЭС также проводится многолетний независимый радиэкологический мониторинг в тридцатикилометровой зоне наблюдения. По результатам многолетних исследований содержание ^{137}Cs в почвах изменяется от 0,6 до 108,5 Бк/кг [37], за период наблюдения отсутствует превышение значений выбросов сверх установленных пределов [38, 39].

Целью данной работы является оценка особенностей распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на контрольных участках зоны наблюдения Ростовской АЭС.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в пределах 30-километровой зоны наблюдения Ростовской АЭС (РоАЭС). Контрольные участки (КУ) были заложены в рамках предпускового мониторинга зоны наблюдения РоАЭС в 1999–2000 гг. (определение так называемого «нулевого фона») [40]. Данная территория расположена в зоне каштановых почв, представляет собой слабоволнистую семиаридную степь, расчлененную

древними балками и оврагами. Большую часть зоны наблюдения РоАЭС занимает приплотинный участок Цимлянского водохранилища [40]. Климат умеренно-континентальный с достаточно холодными зимами и жарким засушливым летом. Значительную часть зоны наблюдения РоАЭС занимают пашни, выпасы и сенокосные угодья.

КУ закладывали на целинных или залежных землях. Выбирали, по возможности, выровненные территории, не планируемые к распашке. Номера КУ, их расположение и типы почв приведены в табл. 1 и на рис. 1.

На контрольных участках (мониторинговых площадках) достаточно разнообразный растительный покров. Некоторые КУ (12, 118а, 133а, 201) характеризуются луговым разнотравьем. На данных площадках произрастают тысячелистник благородный (*Achillea nobilis*), пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare*), цикорий (*Cichorium intybus*), марьянник полевой (*Melampyrum arvense*), полынь австрийская (*Artemisia austriaca*), а также различные злаки. Участки КУ 3 и 75а представляют собой полынно-злаковую степь, здесь преобладают полынь австрийская (*Artemisia austriaca*), овсяница валлиская (*Festuca valesiaca*) и мятлик луговой (*Poa pratensis*).



Рис. 1. Карта-схема отбора почвенных проб в зоне наблюдения Ростовской АЭС

Fig. 1. Map-scheme of soil sampling in the observation zone of the Rostov NPP

Таблица 1. Почвы зоны наблюдения Ростовской АЭС
Table 1. Soils of the observation zone of the Rostov NPP

Шифр КУ Code number	Годы исследований Years of research	Тип почвы Soil types
3	2000–2021	Темно-каштановая солонцеватая тяжело-суглинистая на лессовидных суглинках Dark chestnut saline heavy loamy on loess-like loams
12	2000–2021	Лугово-каштановая мощная тяжело-суглинистая на лессовидных суглинках Meadow-chestnut powerful heavy loam on loess-like loams
75a	2000–2021	Каштановая солонцеватая тяжело-суглинистая на лессовидных суглинках Chestnut saline heavy loamy on loess-like loams
188a	2000, 2001, 2005, 2006, 2014	Лугово-каштановая мощная тяжело-суглинистая на лессовидных суглинках Meadow-chestnut powerful heavy loam on loess-like loams
133a	2000, 2005, 2006, 2018–2021	Темно-каштановая солонцеватая тяжело-суглинистая на лессовидных суглинках Dark chestnut saline heavy loamy on loess-like loams
201	2000–2021	Аллювиально-луговая легкосуглинистая на аллювиальных погребенных отложениях Alluvial-meadow light loamy on alluvial buried sediments

Дозиметрический контроль (измерение МЭД гамма-излучения) на всех контрольных участках вели портативными поисковыми дозиметрами-радиометрами СРП-88н и ДРБП-03 на высоте 2–3 и 100 см от поверхности почвы (в местах отбора почвенных проб) и методами пешеходной гамма-съемки по всему контрольному участку. За весь период мониторинга было проведено более 7000 измерений МЭД. Для интерпретации значений МЭД на различных КУ были отобраны образцы почв методом конверта (со стороны квадрата 10 м) из прикопок глубиной 10 см [41].

Все почвенные пробы высушивали при температуре $t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$, измельчали, просеивали через сито с размером ячейки 1,0 мм и герметично упаковывали в счетные геометрии Маринелли 1 л, Маринелли 0,5 л, Чашка Петри, Дента 0,02 л (диск высотой 7 мм и диаметром 70 мм) в зависимости от количества отобранной пробы.

Удельную активность ^{137}Cs и естественных радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) в почвах определяли инструментальным гамма-спектрометрическим методом радионуклидного анализа. Использовали низкофоновую спектрометрическую установку на основе полупроводникового коаксиального детектора из особо чистого германия (GeHP) с эффективностью 25 % в диапазоне 13–1500 кэВ, отношением пик/компонент 51.7:1 (модель 7229N-7500sl-2520, Canberra Corporate Headquarters, Франция) и гамма-спектрометр «Прогресс-гамма сцинтилляционный» на основе NaI(Tl) детектора. Применяли стандартные методики отбора, подготовки и измерения почвенных проб [42, 43]. Время набора гамма-спектров составляло от 1 до 24 часов, в зависимости от геометрий счетного образца. Погрешность измерения удельной активности ра-

дионуклидов не превышала 30 % (в основном 10–15 %).

Статистическая обработка результатов измерения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на контрольных участках в зоне наблюдения Ростовской АЭС проводилась при помощи программного обеспечения Excel MsOffice, Origin, Statistica. Для проверки вида распределения МЭД в работе применялись критерии проверки гипотезы о нормальном распределении данных Шапиро–Уилка и Колмогорова–Смирнова. Для сравнения данных в работе использовали t-критерий Стьюдента и критерий Фишера.

Результаты и их обсуждение

Гамма-фон (мощность эквивалентной дозы гамма-излучения) является одним из основных факторов, определяющих радиационную обстановку на территориях. В зонах наблюдения предприятий ядерной топливной энергетики гамма-фон подлежит обязательному контролю. На рис. 2 и в табл. 2 приведены результаты оценки мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в разные годы в приземном слое воздуха на высоте 100 см от поверхности почвы (грунта) на контрольных участках.

Все полученные данные сравнивались с «нулевым фоном» [40].

Как правило, распределение гамма-фона на КУ зоны наблюдения Ростовской АЭС достаточно равномерное, при этом строго не подчиняется ни нормальному, ни логарифмически нормальному законам распределения. Также средние арифметические, средние геометрические, модальные и медианные значения МЭД в районе исследования варьируют в пределах неопределенности измерения (стандартного отклонения). Поэтому в данной работе для оценки изменения гамма-фона в зоне наблюдения использовали среднее арифметическое значение МЭД. На рис. 3 представлены результаты длительных (20 лет) измерений МЭД на различной высоте от поверхности почвы в 30-километровой зоне наблюдения Ростовской АЭС.

МЭД, измеренная в период мониторинговых исследований зоны наблюдения Ростовской АЭС, не превышает «нулевой фон» (рис. 3) [40]. При этом гамма-фон у поверхности почвы несколько выше, чем на высоте 100 см. Это обусловлено, как правило, тем, что поглощение (рассеяние) низкоэнергетического (с энергиями менее 100–150 кэВ) гамма-излучения от природных радионуклидов (например, от ^{234}Th , ^{210}Pb) выше на расстоянии 100 см от почвы. Дополнительным фактором может быть несколько большая запыленность надпочвенного слоя воздуха. Не стоит исключать и влияние гамма-излучающих продуктов распада радона и торона на гамма-фон в надпочвенном слое воздуха, особенно в засушливые периоды. Для оценки влияния Ростовской АЭС на гамма-фон в зоне наблюдения был проведен сравнительный анализ данного параметра с гамма-фоном, определенном в 2000 г. (в рамках предпускового мониторинга) [40]. В табл. 3 представлены результаты сравнения МЭД, определенной в каждом году, с «нулевым фоном» с использованием t-критерия Стьюдента.

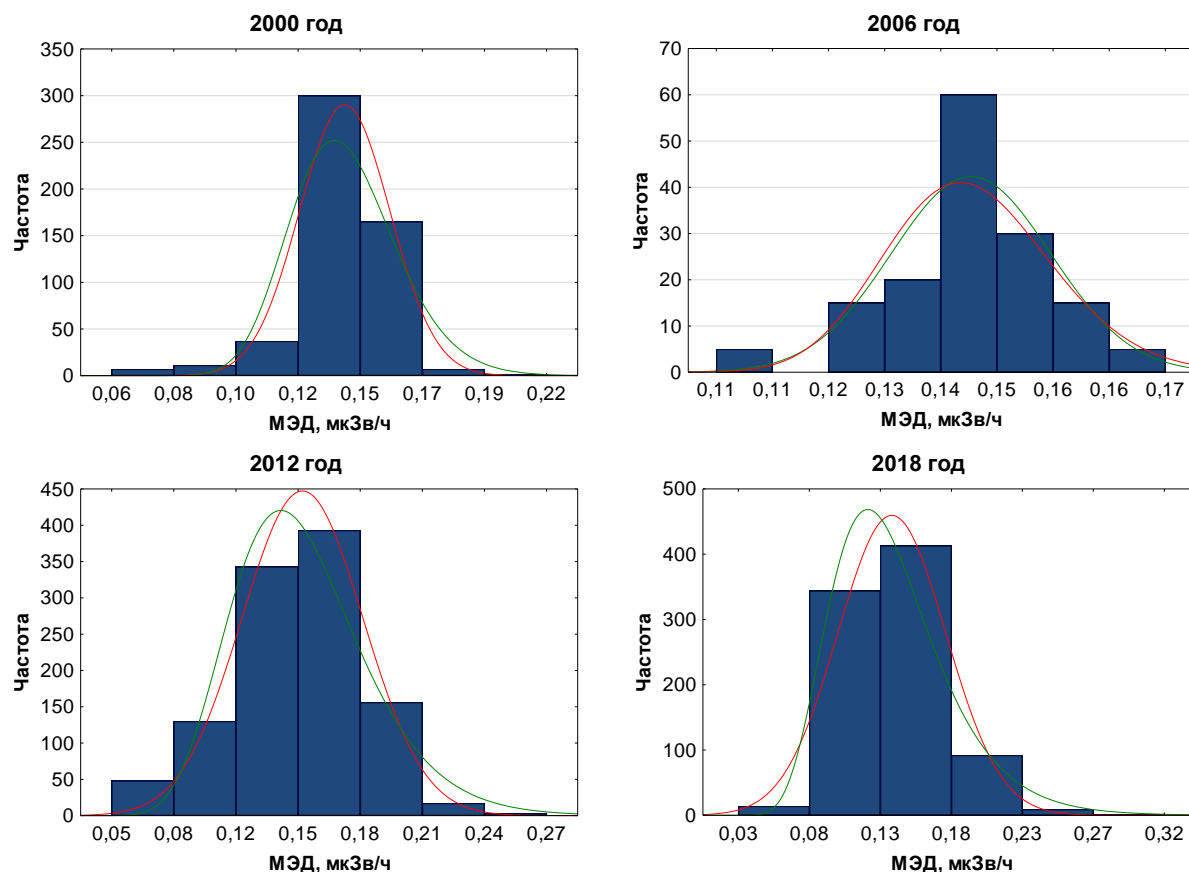


Рис. 2. Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в зоне наблюдения Ростовской АЭС в различные годы

Fig. 2. Distribution of the equivalent dose rate of gamma radiation in the observation zone of the Rostov NPP in different years

Таблица 2. Результаты статистической обработки данных по распределению мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в зоне наблюдения Ростовской АЭС

Table 2. Results of statistical processing of data on distribution of the equivalent dose rate of gamma radiation in the observation area of the Rostov NPP

Параметр/Parameter	Год/Year				
	2000	2006	2010	2015	2021
Минимум, мкЗв/ч/Minimum, $\mu\text{Sv/h}$	0,057	0,106	0,020	0,054	0,010
Максимум, мкЗв/ч/Maximum, $\mu\text{Sv/h}$	0,215	0,173	0,200	0,324	0,240
Среднее арифметическое, мкЗв/ч Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,141	0,144	0,116	0,147	0,128
Среднее геометрическое, мкЗв/ч Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,140	0,143	0,107	0,144	0,122
Медиана, мкЗв/ч/Median, $\mu\text{Sv/h}$	0,145	0,146	0,115	0,135	0,130
Мода, мкЗв/ч/Mode, $\mu\text{Sv/h}$	0,150	0,146	0,080	0,162	0,110
Стандартная ошибка, мкЗв/ч Mean-square error, $\mu\text{Sv/h}$	0,0007	0,0010	0,0076	0,0012	0,0013
Стандартное отклонение, мкЗв/ч Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	0,016	0,012	0,043	0,029	0,037
Дисперсия выборки/Sample variance	0,0003	0,0001	0,0019	0,0008	0,0014
Экцесс/Kurtosis	6,25	2,34	-0,26	2,71	0,13
Асимметричность/Asymmetry	-1,59	-0,53	0,27	0,18	0,29
Распределение Колмогорова–Смирнова Kolmogorov–Smirnov distributions (D/D _{табл})	0,168/ 0,059	0,129/ 0,111	–	0,196/ 0,059	0,081/ 0,047
Критерий Шапиро–Уилка, Shapiro–Wilk statistics ($W^2/W_{крит}^2$)	–	–	0,958/ 0,930	–	–
Количество измерений, шт Number of measurements, pcs	528	150	32	592	821

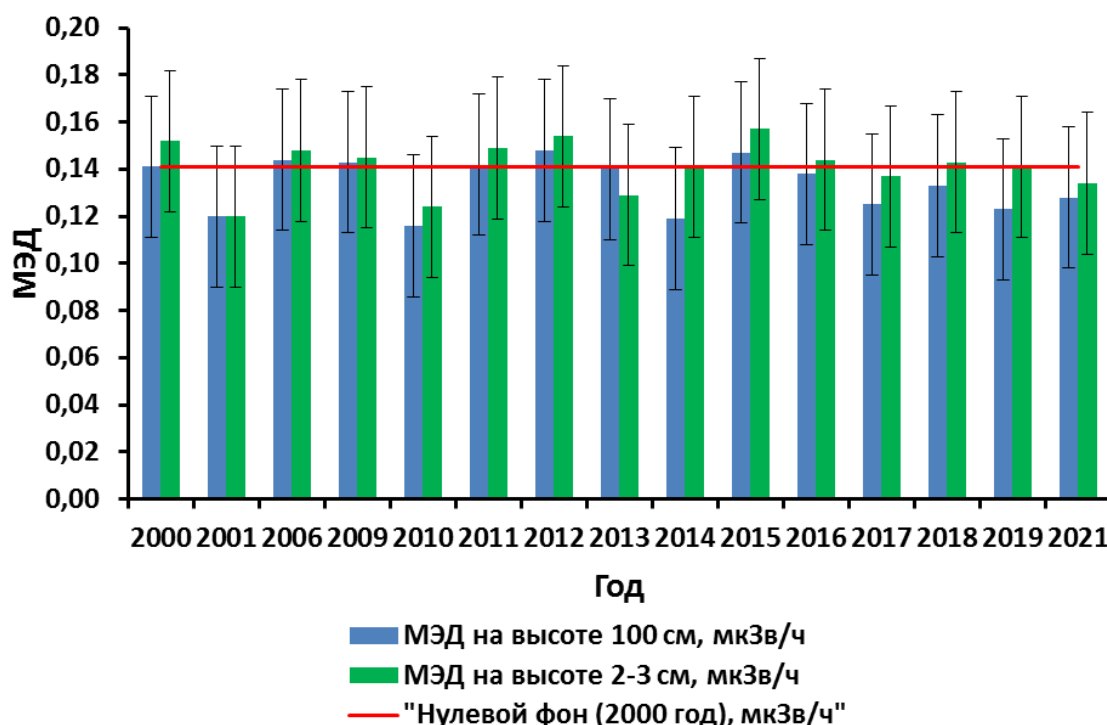


Рис. 3. Изменение средней арифметической мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в зоне наблюдения Ростовской АЭС

Fig. 3. Change in the equivalent dose rate of gamma radiation in the observation zone of the Rostov NPP

Таблица 3. Результаты сравнительного анализа мощности эквивалентной дозы гамма-излучения с результатами предпускового мониторинга (2000 г.)

Table 3. Results of a comparative analysis of the equivalent dose rate of gamma radiation with the results of pre-launch monitoring (2000)

Год Year	Средняя арифм. МЭД, мкЗв/ч Average arithmetic, EDR, $\mu\text{Sv/h}$	$F_{\text{расч}}/F_{\text{крит}}$	$t_{\text{расч}}/t_{\text{крит}}$	$K_{\text{расч}}$	Различие МЭД, мкЗв/ч Difference in EDR, $\mu\text{Sv/h}$
2001	0,120	1,54/2,20	12,29/1,64	182	0,023
2002	0,138	1,31/2,20	0,90/1,64	33	–
2006	0,144	1,91/2,20	3,53/1,64	327	–0,004
2009	0,141	2,62/2,20	0,18/1,67	70	–
2010	0,116	6,89/2,20	5,84/1,69	31	0,040
2011	0,142	2,44/2,20	0,37/1,68	47	–
2012	0,148	3,35/2,20	1,86/1,64	1594	–0,002
2013	0,140	6,50/2,20	3,22/1,64	264	0,008
2014	0,119	6,54/2,20	15,71/1,64	410	0,037
2015	0,147	3,12/2,20	1,45/1,64	953	–
2016	0,138	4,62/2,20	9,13/1,64	1269	0,013
2017	0,126	3,42/2,20	14,69/1,64	885	0,021
2018	0,133	5,25/2,20	11,71/1,64	1296	0,017
2019	0,123	4,16/2,20	19,98/1,64	1540	0,025
2021	0,128	5,20/2,20	16,32/1,64	1214	0,024

Как видно из табл. 3, средняя арифметическая МЭД гамма-излучения в зоне наблюдения Ростовской АЭС варьирует в зависимости от года измерения. При этом все вариации (различия в МЭД по сравнению с «нулевым фоном» 0,141 мкЗв/ч) не превышают стандартного отклонения (неопределенности измерения – 30 %). Ежегодные вариации МЭД связаны с тем, что гамма-фон природных территорий в основном обусловлен излучением от радионуклидов, содержащихся в почве (таких как естественные радионуклиды рядов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K , искусственный ^{137}Cs), плотностью потока радона с поверхности почвы и космического излучения (в том числе и от солнечной радиации).

При этом доля космического излучения и солнечной радиации достаточно сильно зависит от высоты над уровнем моря и широты расположения мониторинговых площадок [44]. При отсутствии значимых высотных и широтных вариаций на разных контрольных участках (мониторинговых площадках) вклад космического излучения и солнечной радиации в гамма-фон на всех КУ принято считать одинаковым. Следовательно, в вариациях гамма-фона в пределах мониторингового года на различных площадках и изменений МЭД по годам в зоне наблюдения РоАЭС особую роль будут играть удельные активности естественных и искусственных радионуклидов, содержащихся в почвах, подстилающих породах и растениях (в том числе и

эманация радона с поверхности почвы), и, возможно, климатические условия в период экспедиций.

Для подтверждения вышесказанного в работе был проведен сравнительный анализ распределения МЭД

на отдельных КУ в зоне наблюдения Ростовской АЭС. Для этого в отдельные годы проводились дополнительные измерения гамма-фона на контрольных площадках (рис. 4, табл. 4).

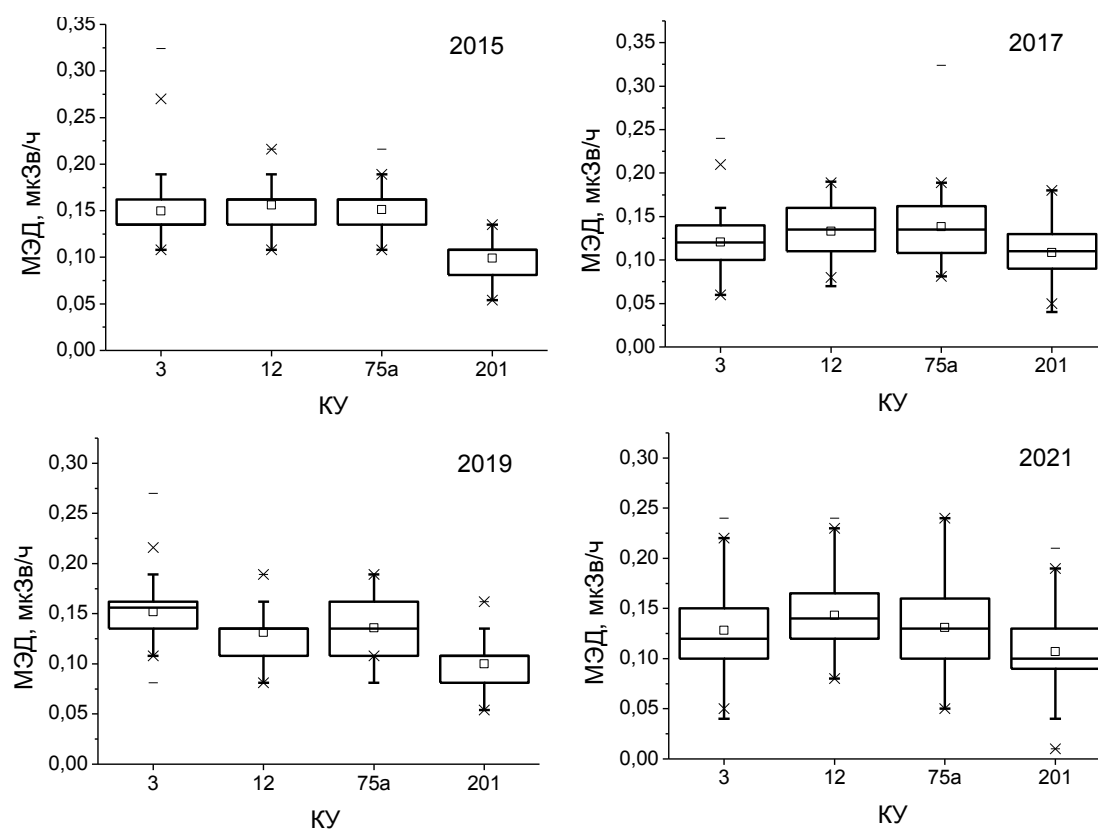


Рис. 4. Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в зоне наблюдения Ростовской АЭС на различных контрольных участках

Fig. 4. Distribution of the equivalent dose rate of gamma radiation in the observation zone of the Rostov NPP in various control areas

Таблица 4. Результаты статистической обработки данных по распределению мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в зоне наблюдения Ростовской АЭС на различных контрольных участках

Table 4. Results of statistical processing of data on the distribution of the equivalent dose rate of gamma radiation in the observation zone of the Rostov NPP in various control sites

Параметр/Parameter	Шифр контрольного участка/Code number			
	3	12	75a	201
2015				
Среднее арифметическое, мкЗв/ч/Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,150	0,156	0,151	0,099
Среднее геометрическое, мкЗв/ч/Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,147	0,155	0,150	0,097
Стандартное отклонение, мкЗв/ч/Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	0,029	0,022	0,022	0,020
Количество измерений, шт./Number of measurements, pcs	167	162	153	60
2017				
Среднее арифметическое, мкЗв/ч/Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,121	0,133	0,138	0,109
Среднее геометрическое, мкЗв/ч/Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,117	0,131	0,135	0,105
Стандартное отклонение, мкЗв/ч/Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	0,028	0,026	0,031	0,029
Количество измерений, шт./Number of measurements, pcs	140	179	109	140
2019				
Среднее арифметическое, мкЗв/ч/Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,152	0,131	0,136	0,100
Среднее геометрическое, мкЗв/ч/Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,150	0,129	0,134	0,098
Стандартное отклонение, мкЗв/ч/Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	0,027	0,024	0,023	0,021
Количество измерений, шт./Number of measurements, pcs	195	221	220	201
2021				
Среднее арифметическое, мкЗв/ч/Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,128	0,143	0,131	0,107
Среднее геометрическое, мкЗв/ч/Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,124	0,139	0,126	0,101
Стандартное отклонение, мкЗв/ч/Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	0,034	0,034	0,037	0,034
Количество измерений, шт./Number of measurements, pcs	190	191	190	190

Минимальные значения гамма-фона ежегодно фиксируются на КУ 201. Этот участок, расположенный в пойме р. Дон, отличается наличием аллювиально-луговых почв с высоким содержанием песка.

Для подтверждения этого на рис. 5 и в табл. 5 представлены результаты определения удельной активности естественных радионуклидов и искусственного радиоцезия в верхнем (0–10 см) слое почвы на КУ.

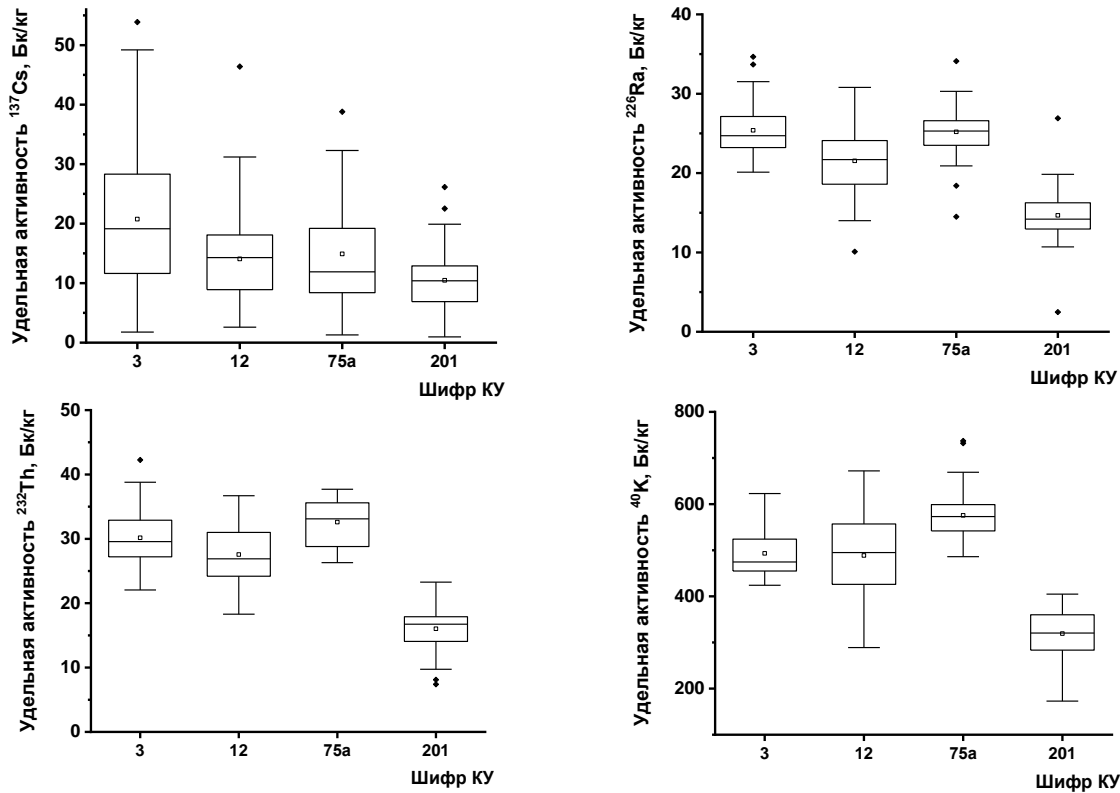


Рис. 5. Распределение удельной активности радионуклидов на контрольных участках
 Fig. 5. Distribution of the activity concentrations of radionuclides in the control sites

Таблица 5. Результаты статистической обработки данных по концентрации радионуклидов в почвах зоны наблюдения Ростовской АЭС на различных контрольных участках

Table 5. Results of statistical processing of data on the concentration of radionuclides in the soils of the observation zone of the Rostov NPP at various control sites

Параметр/Parameter	Шифр контрольного участка/Code number			
	3	12	75a	201
^{137}Cs				
Среднее арифметическое, мкЗв/ч/Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	23,3	13,8	14,6	10,4
Среднее геометрическое, мкЗв/ч/Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	19,1	11,9	11,8	8,6
Стандартное отклонение, мкЗв/ч/Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	13,4	7,9	9,11	5,6
^{226}Ra				
Среднее арифметическое, мкЗв/ч/Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	25,5	21,6	25,2	14,7
Среднее геометрическое, мкЗв/ч/Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	25,3	21,1	24,9	14,2
Стандартное отклонение, мкЗв/ч/Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	3,6	4,6	3,4	3,5
^{232}Th				
Среднее арифметическое, мкЗв/ч/Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	30,3	27,6	32,6	16,0
Среднее геометрическое, мкЗв/ч/Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	30,0	27,1	32,4	15,6
Стандартное отклонение, мкЗв/ч/Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	4,3	4,7	3,5	3,5
^{40}K				
Среднее арифметическое, мкЗв/ч/Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	493,3	488,6	575,5	319,4
Среднее геометрическое, мкЗв/ч/Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	490,8	479,4	573,3	315,1
Стандартное отклонение, мкЗв/ч/Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	51,8	91,5	52,1	50,9

Примечание: Количество измерений на каждом участке 45 штук.
 Note: Number of measurements on each site is 45 pieces.

Как видно из рис. 5 и табл. 5, минимальное содержание естественных радионуклидов фиксируется на КУ 201 с аллювиально-луговыми почвами. Такие почвы с высоким содержанием песка обладают высокой водо-

проницаемостью и низкой сорбцией радионуклидов [45, 46]. Вариации радиоцезия на разных КУ связаны с неравномерным выпадением данного радионуклида после аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.) и последу-

юшей его латеральной и радиальной миграцией [47, 48]. Стоит также учитывать, что, хотя мониторинговые исследования в зоне наблюдения РоАЭС проводятся примерно в одно время (с июня по сентябрь), в отдельные годы наблюдаются различные погодные условия. Для летнего сезона семиаридных степей Ростовской области характерно чередование длительных засушливых периодов с обильными осадками (ливнями) [49].

Заключение

По результатам многолетнего мониторинга на контрольных участках в зоне наблюдения Ростовской АЭС мощность эквивалентной дозы гамма-излучения составляет 0,10–0,14 мкЗв/ч и не превышает резуль-

татов предпускового мониторинга («нулевой фон»). Вариации гамма-фона на контрольных участках региона исследования связаны как с удельной активностью естественных и искусственных радионуклидов в почвах, так и, возможно, с погодными особенностями в различные временные периоды.

Ростовская АЭС не оказывает влияния на радиационную обстановку в 30-ти километровой зоне наблюдения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032), (БА30110/20-3-07ИФ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиационная обстановка на предприятиях Росатома. URL: <https://www.russianatom.ru> (дата обращения 12.09.2022).
2. Отчет по экологической безопасности за 2021 год. – Волгоград: Росэнергоатом. Ростовская АЭС, 2022. – С. 37. URL: <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/863/8634c4a0f3bffa9cfa5981a2384eab92.pdf> (дата обращения 12.09.2022).
3. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2021 году. Ежегодник. – Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», Росгидромет, 2022. – С. 37. URL: https://www.rpatuphoon.ru/upload/medi alibrary/f39/ezhegodnik_го_2021_.pdf (дата обращения 12.09.2022).
4. Белоусова А.П., Захарова Т.В., Швеи В.М. Мониторинг гидросферы в районах расположения АЭС // Водные ресурсы. – 1992. – Т. 19. – № 3. – С. 127–134. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32686075> (дата обращения 12.09.2022).
5. Белоусова А.П. Мониторинг подземных вод в районах расположения АЭС // Разведка и охрана недр. – 2015. – № 4. – С. 65–71. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23251664_54918649.pdf (дата обращения 12.09.2022).
6. Assessment of heavy metals and radionuclides in ground water and associated human health risk appraisal in the vicinity of Rooppur nuclear power plant, Bangladesh / T.R. Choudhury, J. Ferdous, Md.M. Haque, Md.M. Rahman, S.B. Quraishi, M.S. Rahman // Journal of Contaminant Hydrology. – 2022. – V. 251. – P. 104072.
7. Буряева Е.А. Радиоэкологический мониторинг водных экосистем района Ростовской АЭС // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – № 3 (3). – С. 83–92. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18089088> (дата обращения 12.09.2022).
8. Радиоэкологический мониторинг водных экосистем района расположения Балаковской АЭС / С.В. Рязанов, Е.Н. Писаренко, П.Е. Антонов, А.Ю. Хубецов // Теоретическая и прикладная экология. – 2009. – № 3. – С. 31–34. URL: <http://envjournal.ru/ari/v2009/v3/09306.pdf> (дата обращения 12.09.2022).
9. Comprehensive radioecological monitoring of freshwater ecosystems in the vicinity of Rooppur NPP (People’s Republic of Bangladesh) / R. A. Mikailova, D. N. Kurbakov, E. V. Sidorova, I. V. Geshel, N. V. Andreeva, Yu. V. Sorokin, A. V. Panov // Marine Biological Journal. – 2020. – V. 5. – № 3. – P. 30–54. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/7ab8/bc5e7d25f45f5d118839b5c82e168ae5ad18.pdf?_ga=2.257093579.1107403703.1663140917-63571462.1658920840 (дата обращения 12.09.2022).
10. Радиоэкологический мониторинг водных экосистем района расположения Балаковской АЭС / С.В. Рязанов, Е.Н. Писаренко, П.Е. Антонов, А.Ю. Хубецов // Теоретическая и прикладная экология. – 2009. – № 3. – С. 31–34. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12929243_12304055.pdf (дата обращения 12.09.2022).
11. Воронин М.Ю. Многолетний мониторинг макрозообентоса водоема-охладителя Балаковской АЭС // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: химия. Биология. Экология. – 2019. – Т. 19. – № 4. – С. 461–472. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42316313_82532784.pdf (дата обращения 12.09.2022).
12. Marciulioniene D., Montvydiene D. The cooling pond of Ignalina NPP as a model system evaluating effect of radioactive, chemical and thermal pollution to aquatic plants // 8th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2011. – Lithuania, 2011. – P. 111617. URL: https://www.researchgate.net/publication/266440825_The_cooling_pond_of_Ignalina_NPP_as_a_model_system_evaluating_effect_of_radioactive_chemical_and_thermal_pollution_to_aquatic_plants (дата обращения 12.09.2022).
13. Dyachenko T.M., Zub L.N., Tomchenko O.V. Plant cover transformation in the shallow water habitats of the cooling pond of the chernobyl npp as a result of its descent // Hydrobiological Journal. – 2021. – V. 57. – Iss. 6. – P. 3–16. URL: <https://www.dl.begellhouse.com/journals/38cb2223012b73f2,22723b9c5aeaa0ca2791842e75d5426b.html#> (дата обращения 12.09.2022).
14. A review of uncertainties in the assessment of the radiological impact of liquid releases to the Ignalina NPP cooling pond lake Driūkšiai / V. Ragaišis, P. Poškas, R. Kilda, G. Bartkus // Annals of Nuclear Energy. – 2021. – V. 157. – P. 108228. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454921001043?via%3Dihub> (дата обращения 12.09.2022).
15. Changes in the planktonic system of the nuclear power plant cooling pond related to the invasion of Dreissenidae (Mollusca: Bivalvia) / A. Protasov, T. Novoselova, Y. Uzunov, S. Barinova, A. Sylaieva // Acta Zoologica Bulgarica. – 2021. – V. 73. – Iss. 2. – P. 275–288. URL: <https://acta-zoologica-bulgarica.eu/2021/002433.pdf> (дата обращения 12.09.2022).
16. Anthropogenic radionuclides in water samples from the Chernobyl exclusion zone / R. Querfeld, W. Schulz, J. Neubohn, G. Steinhaue // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2018. – V. 318. – Iss. 1. – P. 423–428. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10967-018-6030-y> (дата обращения 12.09.2022).
17. Dynamics of specific activity of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in representatives of ichthyofauna of chernobyl exclusion zone / A. Ye. Kaglyan, D. I. Gudkov, S. I. Kireev, V. G. Klenus, V. V. Belyaev, L. P. Yurchuk, V. V. Drozdov, O. O. Hupalov // Nuclear Physics and Atomic Energy. – 2021. – V. 22. – Iss. 1. – P. 62–73. DOI: 10.15407/jnpae2021.01.062
18. Radionuclides contamination of leaves of woody plants growing within the chNPP cooling pond / V.K. Shynkarenko, S.A. Paskevych, Y.A. Menshenin, O.O. Odintsov // Nuclear Physics and Atomic Energy – 2021. – V. 22. – Iss. 2. – P. 157–166. DOI: 10.15407/jnpae2021.02.157
19. Мониторинг радиоактивности приземного слоя воздуха и атмосферных выпадений в районе расположения АЭС / И.И. Крышев, В.Г. Булгаков, А.И. Крышев, М.Н. Каткова, Т.Г. Сазыкина, Н.Н. Павлова, И.В. Косых, В.Д. Гниломедов, А.А. Буряева, И.Я. Газиев // Атомная энергия. – 2019. – Т. 126. – № 4. – С. 228–234. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37584549> (дата обращения 12.09.2022).
20. Changes in radioactive cesium concentrations from 2011 to 2017 in Fukushima coastal sediments and relative contributions of radioactive cesium-bearing microparticles / A. Kubo, K. Tanabe, Y. Ito, T. Ishimaru, M. Otsuki, H. Arakawa, Y.W. Watanabe, H. Miura, D. Tsumune, J. Kanda // Marine Pollution Bulletin. – 2020. – V. 161. – P. 111769. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33091633/> (дата обращения 30.09.2022).

21. The distributions of ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the northwest Pacific seawater in the winter of 2012 / F. Deng, F. Lin, W. Yu, J. He, F. Wang, Z. Chen // *Marine Pollution Bulletin*. – 2020. – V. 152. – P. 110900. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32479281/> (дата обращения 30.09.2022).
22. Simulation study of radionuclide atmospheric transport after wildland fires in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2020 / M. Talerko, I. Kovalets, T. Lev, Y. Igarashi, O. Romanenko // *Atmospheric Pollution Research*. – 2021. – V. 12. – Iss. 3. – P. 193–204. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104221000210?via%3Dihub> (дата обращения 30.09.2022).
23. Six-year monitoring of the vertical distribution of radiocesium in three forest soils after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident / J. Takahashi, Y. Onda, D. Hihara, K. Tamura // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2019. – V. 210. – P. 105811. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29982001/> (дата обращения 30.09.2022).
24. Charro E., Pardo R., Pena V. Chemo metric interpretation of vertical profiles of radionuclides in soils near a Spanish coal-fired power plant // *Chemosphere*. – 2013. – № 90. – P. 488–496. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22967929/> (дата обращения 30.09.2022).
25. Baseline radioactivity and associated radiological hazards in soils around a proposed nuclear power plant facility, South-South Nigeria / G.B. Ekong, T.C. Akpa, I. Umaru, M.A. Akraowo, S.D. Yusuf, N.U. Benson // *Journal of African Earth Sciences*. – 2021. – V. 182. – P. 104289. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464343X21001904?via%3Dihub> (дата обращения 30.09.2022).
26. Ковалёва Е.В., Черникова А.М. Радиоэкологический мониторинг территории вблизи Нововоронежской АЭС и её влияние на окружающую среду урбандишфтов // *Вектор ГеоНаук*. – 2021. – Т. 4. – № 1. – С. 54–65. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/radioekologicheskii-monitoring-territorii-vbliz-povovoronzhskoy-aes-i-eyo-vliyanie-na-okruzhayushuyu-sredu-urbandshtov/viewer> (дата обращения 12.09.2022).
27. Радиационно-экологический мониторинг агроэкосистем в районе Белоярской АЭС / А.В. Панов, А.В. Трасезников, 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. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45536801_95408761.pdf (дата обращения 12.09.2022).
28. Радиоэкологический мониторинг наземных экосистем в районе расположения Балтийской АЭС / Н.В. Андреева, Е.И. Карпенко, В.К. Кузнецов, С.Н. Нуштаев // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. – 2019. – Т. 30. – № 1–2. – С. 105–120. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41271301> (дата обращения 12.09.2022).
29. Анализ результатов радиационно-экологического мониторинга в регионе размещения Курской АЭС / В.К. Кузнецов, А.В. Панов, Н.И. Санжарова, Н.Н. Исамов, Н.В. Андреева, И.В. Гешель, Е.В. Сидорова // *Радиационная гигиена*. – 2020. – Т. 13. – № 2. – С. 19–30. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44094463_95154702.pdf (дата обращения 12.09.2022).
30. Migration processes of radioactive cesium in the Fukushima near-shore area: impacts of riverine input and resuspension. / T. Misonou, T. Nakanishi, T. Tsuruta, T. Shiribiki, Y. Sanada // *Marine Pollution Bulletin*. – 2022. – № 178. – P. 113597 URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35366555/> (дата обращения 30.09.2022).
31. Role of natural organic matter on iodine and ²³⁹, ²⁴⁰Pu distribution and mobility in environmental samples from the northwestern Fukushima Prefecture, Japan / Ch. Xu, S. Zhang, Y. Sugiyama, N. Ohte, Yi-F. Ho, N. Fujitake, D.I. Kaplan, Ch.M. Yeager, K. Schwehr, P.H. Santschi. // *J. Environ. Radioact.* – 2016. – V. 153. – P. 156–166.
32. Additional report of the Japanese Government to the IAEA – The Accident at TEPCO’s Fukushima Nuclear Power Stations (Second Report) // *International Atomic Energy Agency (IAEA)*. – Tokyo: Government of Japan, 2011. – 45 p. URL: <https://reliefweb.int/report/japan/report-japan-government-iaea-ministerial-conference-nuclear-safety-accident-tepco> (дата обращения 30.09.2022).
33. Sources and effects of ionizing radiation. Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident // *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008)*. – New York, 2016. – P. 45–221.
34. Men Wu. Discharge of contaminated water from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident into the Northwest Pacific: what is known and what needs to be known // *Marine Pollution Bulletin*. – 2021. – P. 112984. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34583249/> (дата обращения 30.09.2022).
35. Современное состояние плодородия почв радиоактивно загрязненных пойменных экосистем Брянской области / А.Л. Силаев, Г.В. Чекин, Е.В. Смольский, А. Новиков // *Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2020. – № 6 (82). – С. 10–16. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44346210_64132058.pdf (дата обращения 12.09.2022).
36. Радиоэкологический мониторинг зоны наблюдения Волгоградской АЭС / Е.А. Бураева, М.Г. Давыдов, Л.В. Зорина, М.А. Кобцева, В.В. Стасов // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2010. – № 5. – С. 154а–159. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14340752> (дата обращения 12.09.2022).
37. Панов А.В., Исамов Н.Н., Кузнецов В.К. Радиационно-экологический мониторинг в регионе размещения Ростовской АЭС. Анализ результатов многолетних исследований // *Радиационная гигиена*. – 2019. – Т. 12. – № 2 (спецвыпуск). – С. 54–65. URL: <https://www.radyh.ru/jour/article/view/629/631> (дата обращения 12.09.2022).
38. Коновалов А.В., Лебедев В.А., Коновалов М.А. Влияние Ростовской атомной станции на безопасность жизнедеятельности населения Ростовской области // *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2018. – № 4. – С. 62–65. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36825231_60328042.pdf (дата обращения 12.09.2022).
39. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2020 году. Ежегодник. – Обнинск: Научно-производственное объединение «Тайфун», 2021. URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/mediabrary/187/ezhegodnik_2020.pdf (дата обращения 12.09.2022).
40. Определение нулевого фона радиоактивного загрязнения земной поверхности района размещения Ростовской АЭС по программе экологического мониторинга: отчет / отв. исп. М.Г. Давыдов – Ростов-на-Дону: Центр радиационной экологии и технологии, 2000. – 96 с.
41. ГОСТ Р 3091-2008. Качество почвы. Отбор проб. Ч. 3. Руководство по безопасности. – М.: Стандартинформ, 2009. – 20 с.
42. Инструментальное определение урана и тория в природных объектах / И.В. Бодров, Е.А. Бураева, М.Г. Давыдов, С.А. Марескин // *Атомная энергия*. – 2004. – Т. 96. – Вып. 4. – С. 271–276. URL: <http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya-196-4-2004/go,28/> (дата обращения 12.09.2022).
43. Компоненты фона Ge(Li)- и GeНР-детектора в пассивной защите / Е.А. Бураева, М.Г. Давыдов, Л.В. Зорина, В.В. Стасов // *Атомная энергия*. – 2007. – Т. 103. – Вып. 5. – С. 318–322. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11685546> (дата обращения 12.09.2022).
44. Ларин А.Е., Малышевский В.С., Фомин Г.В. Высотное и широтное распределение скорости производства ⁷Ве в земной атмосфере в модели «PARMA» // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2014. – Т. 57. – № 6. – С. 88–92. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21800559> (дата обращения 12.09.2022).
45. Безуглова О.С., Хырхырова М.М. Почвы Ростовской области. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2008. – 350 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19514324> (дата обращения 12.09.2022).
46. Носкова Л.М., Шуктомова И.И. Особенности распределения радия в техногенных почвах в зависимости от их физико-химических и минералогических характеристик. // *Геохимия*. – 2015. – № 11. – С. 1043–1050. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24730277_22802865.pdf (дата обращения 12.09.2022).
47. Features of ¹³⁷Cs distribution and dynamics in the main soils of the steppe zone in the southern European Russia / Е.А. Burayeva, O.S. Bezuglova, V.V. Stasov, V.S. Nefedov, E.V. Dergacheva,

- A. A. Goncharenko, S. V. Martynenko, L. Yu. Goncharova, S. N. Gorbov, V. S. Malyshevsky, T. V. Varduny // Geoderma. – 2015. – № 259–260. – P. 259–270. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23973984> (дата обращения 12.09.2022).
48. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред / Ю.А. Израэль, С.М. Вакуловский, В.А. Ветров, В.Н. Петров, Ф.Я. Ровинский, Е.Д. Стукин. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 223 с.
49. Научно-прикладной справочник «Климат России» / В.Н. Разуваев, О.Н. Булыгина, Н.Н. Коршунова, Л.К. Клещенко, В.Н. Кузнецова, Л.Т. Трофименко, А.Б. Шерстюков, Н.В. Швець, С.Г. Давлетшин, Г.Н. Зверева. 2018. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/> (дата обращения 12.09.2022)

Поступила 19.09.2022 г.

Прошла рецензирование 31.10.2022 г.

Информация об авторах

Бураева Е.А., кандидат химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института физики, Южный федеральный университет.

Иванков Д.В., аспирант, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет.

Маломыжева Н.В., лаборант-исследователь Научно-исследовательского института физики, Южный федеральный университет.

Бобылев В.А., лаборант-исследователь Научно-исследовательского института физики, Южный федеральный университет.

Безуголова О.С., доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет.

UDC 504.055

RESULTS OF LONG-TERM RADIOECOLOGICAL MONITORING OF TERRESTRIAL ECOSYSTEMS IN THE OBSERVATION ZONE OF THE ROSTOV NPP

Elena A. Buraeva¹,
buraeva@sfedu.ru

Dmitry V. Ivankov¹,
ivankov@sfedu.ru

Natalya V. Malomyzheva¹,
llia.2013@yandex.ru

Vyacheslav A. Bobylev¹,
slava_bobelev@mail.ru

Olga S. Bezuglova¹,
osbesuglova@sfedu.ru

¹ Southern Federal University,
194, Stachki avenue, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

The relevance of the study is caused by the need for continuous and independent monitoring of the observation zone of the Rostov NPP. In Russia, the nuclear industry is constantly developing and research related to the study of the radiation situation in the territories located in the immediate vicinity of nuclear fuel cycle enterprises is becoming necessary.

The main aim of the study is to evaluate the features of distribution of the equivalent dose of gamma radiation in the control areas of the observation zone of the Rostov NPP.

Objects: the territory located in the 30-kilometer observation zone of the Rostov NPP.

Methods: dosimetric control by pedestrian gamma-ray shooting throughout the control area; soil sampling by the envelope method (with a side of a square of 10 m) from digs with a depth of 10 cm; instrumental gamma-spectrometric method of radionuclide analysis of soil samples.

Results. The paper presents the data on the results of a long-term (2000–2021) study of the equivalent dose rate of gamma radiation in the area where the Rostov NPP is located. The studies were carried out on the control sites established as part of the pre-launch monitoring of this object (definition of «zero background»). Dosimetry of the territories was carried out using search dosimeters-radiometers. It is shown that, on average, the gamma background varies within 0,10–0,14 $\mu\text{Sv/h}$, does not exceed the results of pre-start monitoring of the Rostov NPP observation zone, and depends on the radionuclide composition of the soil cover.

Key words:

distribution, equivalent dose rate of gamma radiation, nuclear power plant (NPP), monitoring, radiation.

Research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State assignment in the field of scientific activity, Southern Federal University, no. 0852-2020-0032, 2020).

REFERENCES

1. *Radiatsionnaya obstanovka na predpriyatiyakh Rosatoma* [Radiation situation at Rosatom enterprises]. Available at: <https://www.russianatom.ru> (accessed 12 September 2022).
2. *Otchet po ekologii cheskoj bezopasnosti za 2021 god* [Environmental Safety Report for 2021]. Volgogradsk, Rosenergoatom. Rostovskaya AES, 2022. 37 p. Available at: <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/863/8634c4a0f3bbfa9cfa5981a2384eab92.pdf> (accessed 12 September 2022).
3. *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredelnykh gosudarstv v 2021 godu. Ezhegodnik* [Radiation situation on the territory of Russia and neighboring states in 2021. Yearbook]. Obninsk, FGBU «NPO «Tayfun», Rosgidromet, 2022. 350 p. Available at: https://www.rp.atyphoon.ru/upload/medi alibrary/f39/ezhegodnik_ro_2021_.pdf (accessed 12 September 2022).
4. Belousova A.P., Zakharova T.V., Shvets V.M. Monitoring gidrosfery v rayonakh raspolozheniya AES [Hydrosphere monitoring in the areas of the NPP location.] *Vodnye resursy*, 1992, vol. 19, no. 3, pp. 127–134. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32686075> (accessed 12 September 2022).
5. Belousova A.P. Monitoring podzemnykh vod v rayonakh raspolozheniya AES [Monitoring of groundwater in the areas of the NPP location]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2015, no. 4, pp. 65–71. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23251664_54918649.pdf (accessed 12 September 2022).
6. Choudhury T.R., Ferdous J., Haque Md.M., Rahman Md.M., Quraishi S.B., Rahman M.S. Assessment of heavy metals and radionuclides in groundwater and associated human health risk appraisal in the vicinity of Rooppur nuclear power plant, Bangladesh. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2022, vol. 251, pp. 104072.
7. Buraeva E.A. Radioecological monitoring of aquatic ecosystems of the Rostov NPP area. *Globalnaya yadernaya bezopasnost*, 2012, no. S (3), pp. 83–92. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18089088> (accessed 12 September 2022).
8. Ryazanov S.V., Pisarenko E.N., Antonov P.E., Khubetsov A.Yu. Radioekologicheskij monitoring vodnykh ekosistem rayona raspolozheniya Balakovskoy AES [Radioecological monitoring of aquatic ecosystems of the Balakovo NPP location area]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2009, no. 3, pp. 31–34. Available at: <http://envjournal.ru/ari/v2009/v3/09306.pdf> (accessed 12 September 2022).
9. Mikhailova R.A., Kurbakov D.N., Sidorova E.V., Geshel I.V., Andreeva N.V., Sorokin Yu.V., Panov A.V. Comprehensive radioecological monitoring of freshwater ecosystems in the vicinity of Rooppur NPP (People's Republic of Bangladesh). *Marine Biological Journal*, 2020, vol. 5, no. 3, pp. 30–54. In Rus. Available at: https://pdfs.semanticscholar.org/7ab8/bc5e7d25f45f5d118839b5c82e168ae5ad18.pdf?_ga=2.257093579.1107403703.1663140917-63571462.1658920840 (accessed 12 September 2022).
10. Ryazanov S.V., Pisarenko E.N., Antonov P.E., Khubetsov A.Yu. Radioekologicheskij monitoring vodnykh ekosistem rayona

- raspolozheniya Balakovskoy AES [Radioecological monitoring of aquatic ecosystems of the Balakovo NPP location area]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2009, no. 3, pp. 31–34. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12929243_12304055.pdf (accessed 12 September 2022).
11. Voronin M. Yu. Long-term monitoring of macrozoobenthos of the cooling reservoir of the Balakovo NPP. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: khimiya. Biologiya. Ekologiya*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 461–472. In Rus. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42316313_82532784.pdf (accessed 12 September 2022).
 12. Marciulioniene D., Montvydiene D. The cooling pond of Ignalina NPP as a model system evaluating effect of radioactive, chemical and thermal pollution to aquatic plants. *8th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2011*. Lithuania, 2011, pp. 111617. Available at: https://www.researchgate.net/publication/266440825_The_cooling_pond_of_Ignalina_NPP_as_a_model_system_evaluating_effect_of_radioactive_chemical_and_thermal_pollution_to_aquatic_plants (accessed 12 September 2022).
 13. Dyachenko T.M., Zub L.N., Tomchenko O.V. Plant cover transformation in the shallow water habitats of the cooling pond of the Chernobyl NPP as a result of its descent. *Hydrobiological Journal*, 2021, no. 57, Iss. 6, pp. 3–16. Available at: <https://www.dl.bejellhouse.com/journals/38cb2223012b73f2.22723b9c5aeea0ca.2791842e75d5426b.html#> (accessed 12 September 2022).
 14. Ragaišis V., Poškas P., Kilda R., Bartkus G. A review of uncertainties in the assessment of the radiological impact of liquid releases to the Ignalina NPP cooling pond lake Drūkšiai. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, vol. 157, pp. 108228. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454921001043?via%3Dihub> (accessed 12 September 2022).
 15. Protasov A., Novoselova T., Uzunov Y., Barinova S., Sylaieva A. Changes in the planktonic system of the nuclear power plant cooling pond related to the invasion of dreissenidae (Mollusca: Bivalvia). *Acta Zoologica Bulgarica*, 2021, vol. 73, Iss. 2, pp. 275–288. Available at: <https://acta-zoologica-bulgarica.eu/2021/002433.pdf> (accessed 12 September 2022).
 16. Querfeld R., Schulz W., Neubohn J., Steinhaus G. Anthropogenic radionuclides in water samples from the Chernobyl exclusion zone. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2018, vol. 318, Iss. 1, pp. 423–428. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10967-018-6030-y> (accessed 12 September 2022).
 17. Kaglyan A.Ye., Gudkov D.I., Kireev S.I., Klenus V.G., Belyaev V.V., Yurchuk L.P., Drozdov V.V., Hupalo O.O. Dynamics of specific activity of 90Sr and 137Cs in representatives of ichthyofauna of chernobyl exclusion zone. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 2021, vol. 22, Iss. 1, pp. 62–73. DOI: 10.15407/jnpae2021.01.062
 18. Shynkarenko V.K., Paskevych S.A., Menshenin Y.A., Odintsov O.O. Radionuclides contamination of leaves of woody plants growing within the chnpp cooling pond. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 2021, vol. 22, Iss. 2, pp. 157–166. DOI: 10.15407/jnpae2021.02.157
 19. Kryshev I.I., Bulgakova V.G., Kryshev A.I., Katkova M.N., Sazykina T.G., Pavlova N.N., Kosykh I.V., Gnilomedov V.D., Buryakova A.A., Gaziev I.YA. Radioactivity monitoring of the surface air layer and atmospheric fallout near NPP. *Atomic Energy*, 2019, vol. 126, no. 4, pp. 228–234. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37584549> (accessed 12 September 2022).
 20. Kubo A., Tanabe K., Ito Y., Ishimaru T., Otsuki M., Arakawa H., Watanabe Y.W., Miura H., Tsumune D., Kanda J. Changes in radioactive cesium concentrations from 2011 to 2017 in Fukushima coastal sediments and relative contributions of radioactive cesium-bearing microparticles. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, vol. 161, pp. 111769. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33091633/> (accessed 12 September 2022).
 21. Deng F., Lin F., Yu W., He J., Wang F., Chen Z. The distributions of 134Cs, 137Cs and 90Sr in the north west Pacific seawater in the winter of 2012. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, vol. 152, pp. 110900. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32479281/> (accessed 12 September 2022).
 22. Talerko M., Kovalets I., Lev T., Igarashi Y., Romanenko O. Simulation study of radionuclide atmospheric transport after wildland fires in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2020. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, vol. 12, Iss. 3, pp. 193–204. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104221000210?via%3Dihub> (accessed 12 September 2022).
 23. Takahashi J., Onda Y., Hihara D., Tamura K. Six-year monitoring of the vertical distribution of radiocesium in three forest soils after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2019, vol. 210, pp. 105811. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29982001/> (accessed 12 September 2022).
 24. Charro E., Pardo R., Pena V. Chemometric interpretation of vertical profiles of radionuclides in soils near a Spanish coal-fired power plant. *Chemosphere*, 2013, no. 90, pp. 488–496. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22967929/> (accessed 12 September 2022).
 25. Ekong G.B., Akpa T.C., Umaru I., Akpaowo M.A., Yusuf S.D., Benson N.U. Baseline radioactivity and associated radiological hazards in soils around a proposed nuclear power plant facility, South-South Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, 2021, vol. 182, pp. 104289. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464343X21001904?via%3Dihub> (accessed 12 September 2022).
 26. Kovalyova E.V., Chernikova A.M. Radioecological monitoring of the area near Novovoronezhskaya NPP and its impact on the environment of urbolandshafts. *Vektor GeoNauk*, 2021, vol. 4, no. 1, pp. 54–65. In Rus. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/radioekologicheskii-monitoring-territorii-vblizii-novovoronezhskoy-aes-i-eyo-vliyanie-na-okruzhayushchuyu-sredunobolandshtov/viewer> (accessed 12 September 2022).
 27. Panov A.V., Trapeznikov A.V., Kuznetsov V.K., Korzhavin A.V., Isamov N.N., Geshel I.V. Radioecological monitoring of agroecosystems in the vicinity of Beloyarsk NPP. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 146–157. In Rus. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45536801_95408761.pdf (accessed 12 September 2022).
 28. Andreeva N.V., Karpenko E.I., Kuznetsov V.K., Nushtayev S.N. Radio-ecological monitoring of terrestrial ecosystems in the area of the Baltic NPP. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2019, vol. 30, no. 1–2, pp. 105–120. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41271301> (accessed 12 September 2022).
 29. Kuznetsov V.K., Tsygvintsev P.N., Sanzharova N.I., Panov A.V. The analysis of radioecological monitoring results in the vicinity of the Kursk Nuclear power Plant. *Radiation hygiene*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 19–30. In Rus. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_46157964_22774026.pdf (accessed 12 September 2022).
 30. Misonou T., Nakinishi T., Tsuruta T., Shiribiki T., Sanada Y. Migration processes of radioactive cesium in the Fukushima near-shore area: Impacts of riverine input and resuspension. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, no. 178, pp. 113597. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35366555/> (accessed 12 September 2022).
 31. Xu Ch., Zhang S., Sugiyama Y., Ohte N., Ho Yi-F., Nobuhide Fujitake, Kaplan D.I., Yeager Ch.M., Schwehr K., Santschi P.H. Role of natural organic matter on iodine and 239, 240Pu distribution and mobility in environmental samples from the northwestern Fukushima Prefecture, Japan. *J. Environ. Radioact.*, 2016, vol. 153, pp. 156–166.
 32. *Additional report of the Japanese Government to the IAEA – The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations (Second Report)*. Tokyo, Government of Japan, 2011. 45 p. Available at: <https://reliefweb.int/report/japan/report-japanese-government-iaea-ministerial-conference-nuclear-safety-accident-tepcos> (accessed 12 September 2022).
 33. Sources and effects of ionizing radiation. Annex D: health effects due to radiation from the Chernobyl accident. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008)*. New York, 2016. pp. 45–221.
 34. Men Wu. Discharge of contaminated water from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident into the North west Pacific: what is known and what needs to be known. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, pp. 112984. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34583249/> (accessed 12 September 2022).

35. Silaev A.L., Chekin G.V., Smolskiy E.V., Novikov A. Current state of soil fertility of radioactively contaminated floodplain ecosystems of the Bryansk region. *Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*, 2020. no. 6 (82), pp. 10–16. In Rus. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44346210_64132058.pdf (accessed 12 September 2022).
36. Buraeva E.A., Davydov M.G., Zorina L.V., Kobtseva M.A., Stasov V.V. Radioecological monitoring of observation zone of the Volgodonsk atomic power station. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 5, pp. 154a–159. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14340752> (accessed 12 September 2022).
37. Panov A.V., Isamov N.N., Kuznetsov V.K. Radiation and environmental monitoring in the Rostov NPP location region. Analysis of the results of long-term research. *Radiatsionnaya gigena*, 2019, vol. 12, no. 2 (spetsvypusk), pp. 54–65. In Rus. Available at: <https://www.radhyg.ru/jour/article/view/629/631> (accessed 12 September 2022).
38. Kononov A.V., Lebedev V.A., Kononov M.A. Effect of the Rostov nuclear power plant on safety of the population of the Rostov region. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta puty soobshcheniya*, 2018, no. 4, pp. 62–65. In Rus. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36825231_60328042.pdf (accessed 12 September 2022).
39. *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredelnykh gosudarstv v 2020 godu. Ezhгодnik* [Radiation situation on the territory of Russia and neighboring states in 2020. Yearbook]. Obninsk, Nauchno-proizvodstvennoe obединenie «Tayfun» Publ., 2021. Available at: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/187/ezhгодnik_ro_2020.pdf (accessed 12 September 2022).
40. *Opređelenie nulevogo fona radioaktivnogo zagryazneniya zemnoy poverkhnosti rayona razmeshcheniya Rostovskoy AES po programme ekologicheskogo monitoringa: ochet* [Determination of the zero background of radioactive contamination of the Earth's surface of the Rostov NPP location area under the environmental monitoring program: Report]. Ed. by M.G. Davydov. Rostov-na-Don, Tsentr radiatsionnoy ekologii i tekhnologii Publ., 2000. 96 p.
41. *GOST R R3091-2008. Kachestvo pochvy. Otkor prob. Ch. 3. Rukovodstvo po bezopasnosti* [State Standart R R3091-2008. Soil quality. Sampling. P. 3. Safety manual]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 20 p.
42. Bodrov I.V., Buraeva E.A., Davydov M.G., Mareskin S.A. Instrumental determination of uranium and thorium in natural objects. *Atomic Energy*, 2004, vol. 96, no. 4, pp. 246–249. In Rus. Available at: http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t96-4_2004/go,28/ (accessed 12 September 2022).
43. Buraeva E.A., Davydov M.G., Zorina L.V., Stasov V.V. Components of the background of Ge(Li) and Ge detectors in passive shielding. *Atomic Energy*, 2007, vol. 103, no. 5, pp. 895–900. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11685546> (accessed 12 September 2022).
44. Larin A.E., Malyshevskiy V.S., Fomin G.V. Altitude and latitudinal distribution of velocity of ^7Be production in earth atmosphere in «PARMA» model. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Fizika*, 2014, vol. 57, no. 6, pp. 88–92. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21800559> (accessed 12 September 2022).
45. Bezuglova O.S., Khyrkhyrova M.M. *Pochvy Rostovskoy oblasti* [Soils of the Rostov region]. Rostov n/D, YuFU Publ., 2008. 352 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19514324> (accessed 12 September 2022).
46. Noskova L.M., Shuktomova I.I. Radium distribution in anthropogenic soil as a function of soil physicochemical and mineralogical parameters. *Geokhimiya*, 2015, no. 11, pp. 1043–1050. In Rus. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24730277_22802865.pdf (accessed 12 September 2022).
47. Buraeva E.A., Bezuglova O.S., Stasov V.V., Nefedov V.S., Dergacheva E.V., Goncharenko A.A., Martynenko S.V., Goncharova L.Yu., Gorbov S.N., Malyshevskiy V.S., Vardunov T.V. Features of ^{137}Cs distribution and dynamics in the main soils of the steppe zone in the southern European Russia. *Geoderma*, 2015, no. 259–260, pp. 259–270. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23973984> (accessed 12 September 2022).
48. Izrael Yu.A., Vakulovskiy S.M., Vetrov V.A., Petrov V.N., Rovinskiy F.Ya., Stukin E.D. *Chernobyl: radioaktivnoe zagryaznenie prirodnykh sred* [Chernobyl: radioactive pollution of natural environments]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 223 p.
49. Razuvaev V.N., Bulygina O.N., Korshunova N.N., Kleshchenko L.K., Kuznetsova V.N., Trofimenko L.T., Sherstyukov A.B., Shvets N.V., Davletshin S.G., Zvereva G.N. *Nauchno-prikladnoy spravochnik «Klimat Rossii»* [Scientific and applied handbook «Climate of Russia»]. 2018. Available at: http://aisori.meteo.ru/clim_sprn (accessed 12 September 2022).

Received: 19 September 2022.

Reviewed: 31 October 2022.

Information about the authors

Elena A. Buraeva, Cand. Sc., associate professor, leading researcher, Southern Federal University.

Dmitry V. Ivankov, postgraduate student, Southern Federal University.

Natalya V. Malomyzheva, research laboratory assistant, Southern Federal University.

Vyacheslav A. Bobylev, research laboratory assistant, Southern Federal University.

Olga S. Bezuglova, Dr. Sc., professor, Southern Federal University.

УДК 622.245.422.2

ОЦЕНКА УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНО-ЭПОКСИДНЫХ СИСТЕМ

Блинов Павел Александрович¹,

Blinov_PA@pers.spmi.ru

Садыков Марат Ильдарович¹,

s205064@stud.spmi.ru, maratsadykov96@gmail.com

¹ Санкт-Петербургский горный университет,

Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2.

Актуальность исследования определена условиями эксплуатации и заканчивания скважин в современных условиях. В процессе строительства скважин тампонажный материал, используемый при креплении обсадных колонн, испытывает динамические нагрузки, в результате которых теряет свою целостность, что приводит к нарушению герметичности затрубного пространства и последующим перетокам пластовых флюидов. К динамическим нагрузкам относится динамика работы бурового инструмента при нормализации, операции по вторичному вскрытию, гидравлическому разрыву пласта, опрессовки обсадной колонны после срока ожидания затвердевания цементного камня. Упругие свойства цементного камня из различных составов определены с помощью ультразвуковых методов оценки, прочностные свойства определены разрушающими методами контроля по стандартам API 10B-2/ISO 10426-2. Существует ряд трудов и отраслевых решений подрядчиков по цементированию скважин, относящихся к созданию упругих цементных систем, однако во многом данные разработки не в полной мере решают обозначенные проблемы и являются зависимыми от импортных компонентов.

Цель: разработка состава цементного раствора с повышенными упруго-прочностными свойствами из российских компонентов.

Объект: объектом исследования является цементный камень и его упруго-прочностные свойства.

Результаты. В ходе экспериментальных исследований отмечается повышение прочности на изгиб и улучшение упругих свойств цементно-эпоксидного камня при использовании эпоксидной смолы в составе цементной системы, определено распределение смолы в составе цементного камня с помощью методов 3D рентгеновского сканирования, отмечены достоинства и недостатки добавок-эластификаторов, подобраны концентрации добавок, улучшающих технологические свойства цементного раствора и камня.

Ключевые слова:

цементный камень, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, ультразвук, прочность на сжатие, прочность на изгиб, проницаемость, эластичные цементы, эластификаторы.

Введение

В настоящее время на рынке энергоресурсов все большее распространение получают зеленые технологии. Использование и внедрение данных технологий обусловлено мировой тенденцией снижения потребления ископаемых видов топлива [1–5].

Однако, согласно отчетам международной нефтесервисной компании Baker Hughes, каждый год увеличивается количество буровых установок, так, с 2021 по 2022 гг. количество буровых установок в мире увеличилось на 430 единиц, преимущественно в азиатском регионе, что говорит об увеличении объемов эксплуатационного бурения. Факт увеличения объемов бурения скважин подтверждается также увеличением стоимости нефти марки Brent, так, с ноября 2019 г. по октябрь 2022 г. стоимость нефти увеличилась с 60 до 90 долларов за баррель, что говорит о растущем спросе на энергоносители [3, 6, 7].

С каждым годом увеличиваются глубины бурения и усложняются геологические условия проводки скважин, вместе с тем усложняются и условия заканчивания скважин [6–11].

Успешность продуктивной эксплуатации скважин во многом определяется надежностью изоляции пластов, т. к. основная цель цементирования – разобщение пластов и создание герметичного барьера. Самым распространенным тампонажным материалом является цементный раствор на основе портландцемента

различных классов, а класс портландцемента подбирается исходя из геологических условий проведения работ [12–16].

Улучшение упругих свойств цементного камня во многом обосновано современными реалиями методов освоения и строительства скважин, т. к. на крепь оказываются динамические нагрузки, например, удары КБТ (колонны буровых труб) и КНБК (компоновки низа буровой колонны) при бурении и разбуривании цементного стакана, нагрузки, вызванные операциями вторичного вскрытия, ГРП (гидравлический разрыв пласта), а также МГРП (многостадийный гидроразрыв пласта) и т. д. [14–22].

Учитывая современные тенденции жизненного цикла скважины во время бурения и освоения, необходимо проводить исследования по разработке упругих цементных систем, которые могут быть устойчивыми к динамическому воздействию [12, 17–19].

Материалы и методы исследования

Методика приготовления цементного раствора базируется на стандартах API 10B-2 и ISO 10426, которые включают в себя рекомендации по времени приготовления, кондиционированию и подготовке образцов. Температура испытаний соответствует средним забойным температурам эксплуатационных колонн и хвостовиков Западной Сибири как одной из основных нефтегазоносных провинций [23–25].

Время ОЗЦ выбрано на отметке 10 суток, как среднее время от окончания процесса цементирования до проведения операций ГРП/МГРП, учитывая время на нормализацию цементного стакана, подъем и разборку КНБК, ГИС и т. д.

С целью определения прочностных свойств цементный раствор помещался в призмы $40 \times 40 \times 160$ мм, где происходило формирование цементного камня при определенных термических условиях в водной среде. Использование призм позволяет провести испытания по определению прочностных свойств цементного камня разрушающим методом и определить упругие свойства ультразвуковым – неразрушающим методом [25, 26].

Ультразвуковой метод определения деформационных характеристик цемента – это способ неразрушающей оценки свойств цементного камня, который основывается на зависимости косвенных показателей, таких как скорость и время распространения ультразвуковой волны, от упругих характеристик цемента.

Ультразвуковые испытания цементного камня проводились на приборах Пульсар-2.2 и A1220 Monolith. Пульсар-2.2 использовался для определения продольных волн в образце цементного камня, а для измерения поперечных волн в цементе с помощью наклонных пьезометрических преобразователей в работе использовался ультразвуковой прибор A1220 Monolith [27].

На основании полученных данных (времени волны, скорости продольной и поперечной волн, а также плотности образца) рассчитывается модуль упругости в Па по формуле:

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)},$$

где ρ – плотность образца, кг/м^3 ; V_s – скорость поперечной волны, м/с ; V_p – скорость продольной волны, м/с .

Коэффициент Пуассона рассчитывается по формуле:

$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)},$$

Испытания по определению прочностных свойств производились на прессе CONTROLS Pilot 3 (рис. 1).



Рис. 1. Гидравлический пресс CONTROLS Pilot 3
Fig. 1. Hydraulic press CONTROLS Pilot 3

Обработка результатов и схема нагружения определялась в соответствии с методиками API 10 B-2/ISO-10426 и ГОСТ [25, 26].

Результаты исследования и их обсуждение

Тампонажный раствор на основе портландцемента – это хорошо изученный материал, технологические свойства которого можно регулировать в широких диапазонах, используя специальные химические добавки. Основным недостатком цементных растворов являются низкие упругие свойства цементного камня и низкая восприимчивость динамических нагрузок, на что указывают относительно высокие значения модуля Юнга и низкие значения коэффициента Пуассона [12, 17].

Модуль Юнга – физическая величина, которая характеризует свойство тела сопротивляться приложенной нагрузке при упругой деформации, а коэффициент Пуассона – это механическая характеристика материала, характеризующая отношение поперечной деформации элемента к продольной. Таким образом, характеристиками материала, описывающими его упругие свойства, являются коэффициент Пуассона и модуль Юнга.

Цементный камень нормальной плотности без добавок-эластификаторов является твердым телом с характерным динамическим модулем Юнга в диапазоне 18–19 ГПа и динамическим коэффициентом Пуассона – 0,13–0,15. Динамические модуль Юнга и коэффициент Пуассона, как правило, определяются ультразвуковыми методами оценки упругих свойств материала [12, 17, 28, 29].

Улучшать упругие свойства цементного камня можно использованием различных добавок, которые обладают рядом ограничений и недостатков:

- 1) эластомеры на основе продуктов переработки резины характеризуются возможностью кольматации кольцевых пространств поплавкового оборудования обсадных колонн при превышении определенной концентрации (по производственным данным, свыше 6 %), как следствие, при превышении опасной концентрации возможно получение преждевременного момента «Стоп», обнаружение ненормативного цементного стакана и недоподъема цементного раствора до плановой глубины;
- 2) диспергируемые эластификаторы на основе латексов ограниченно применимы из-за необходимости использования осреднительной емкости для цементирования, а также при превышении концентрации 3 % цементный раствор ухудшает свою стабильность, отмечается быстрый набор структурных свойств раствора, снижение времени загустевания;
- 3) смолы отличаются необходимостью использования осреднительной емкости для цементирования, также требуется прогрев смолы в холодное время года на участке производства работ перед цементованием.

Проведя оценку ограничивающих факторов по использованию реагентов-эластификаторов в составе

цементных растворов, эпоксидная смола выбрана как наиболее подходящий эластикатор для проведения исследований, т. к. применение смолы в качестве эластикатора отличается большей вариативностью концентраций, меньшими рисками при проведении работы и большей степенью однородности цементной системы [12, 14, 17, 20, 21].

Операции вторичного вскрытия, ГРП, МГРП и динамика работы бурильного инструмента оказывают

динамическое воздействие на цементный камень, находящийся за обсадной колонной, которые, как правило, могут приводить к ухудшению целостности крепи, вызывая радиальное растрескивание цементного камня, образование микрозазоров или необратимые деформации (рис. 2), что впоследствии приводит к значительным зонам заколонной циркуляции и увеличению обводненности скважинного продукта [9, 17–20, 22, 28].

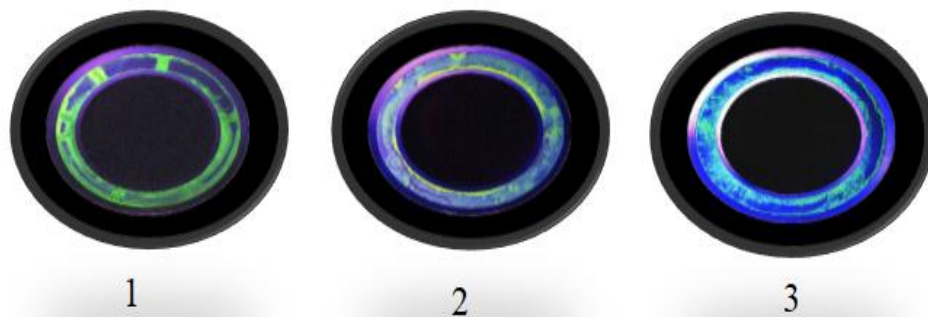


Рис. 2. Изображение дефектов цементного камня за обсадной колонной в ультрафиолетовом свете (1 – радиальное растрескивание; 2 – необратимые деформации; 3 – микрозазоры)

Fig. 2. Image of defects in the cement stone behind the casing string in ultraviolet light (1 – radial cracking; 2 – irreversible deformations; 3 – micro clogs)

Для проведения исследований разработаны цементные составы с вариативной концентрацией смолы в составе смеси, в качестве эталонного образца для оценки изменения упругих свойств выбран состав цементной смеси, наиболее часто используемый подрядчиками по цементированию, – цементная смесь, содержащая 5 % эластомеров на основе переработки резины. Также для сопоставления результатов экспериментов оценивались свойства базового цементного раствора нормальной плотности без добавок, влияющих на упругие свойства цементного раствора.

Плотность цементных растворов (ЦР 1-6) выбрана на отметке $1,84 \text{ г/см}^3$, что соответствует плотности цементных растворов нормальной плотности, используемых для цементирования ГРП/МГРП скважин, размещаемых, как правило, в интервалах продуктивных горизонтов [11, 22–24]. Для придания цементным растворам технологических свойств использовались следующие химические реагенты:

- 1) цемент – портландцемент тампонажный ПЦТ 1–G–СС (Сухоложский цементный завод, Россия);
- 2) замедлитель – лигносульфонатный замедлитель для умеренных температур (Россия);
- 3) регулятор водоотдачи – полимер проп-2-еновой кислоты с 2-метил-2-[(1-оксопроп-2-енил)амино]-1-пропансульфоновой кислотой (Россия);
- 4) пеногаситель – смесь диоксида кремния, минерального масла, n-Деканола и 1-Гептанола (Россия);
- 5) смола – диглицидиловый эфир бисфенола А (Россия);
- 6) отвердитель – полиэтиленполиамин (Россия);
- 7) эластомер – смесь резиновых компонентов 30–60 меш (пр-во США);
- 8) латекс – диспергируемый в воде латекс (Россия).

Составы цементных растворов с добавками-эластикаторами создавались на основе базового

цементного раствора (ЦР-1) плотностью $1,84 \text{ г/см}^3$. В экспериментах учитывалось, что некоторые добавки снижают плотность цементного раствора, поэтому плотность растворов рассчитывалась с учетом плотности добавок-эластикаторов путем регулирования ВЦ (водоцементного отношения). Плотность цементных растворов проверялась на герметизированных рычажных весах. Составы цементных растворов и полученные результаты экспериментов находятся в таблице, наглядно результаты отражены на рис. 3–5.

По результатам экспериментальных исследований проведено изучение образцов цементного камня на рентгеновском сканере. Для исследований выбран образец № 1 (рис. 6), как базовый состав, и № 5 (рис. 7), как состав, показавший наилучшие результаты.

По результатам, интерпретации рис. 6, 7 видно, что поровое пространство базового цементного камня представлено цементным камнем высокой пористости. Поровое пространство цементно-эпоксидного камня равномерно заполнено эпоксидной смолой. Эпоксидная смола внутри порового пространства цементного камня образует связную решетку [30], за счет которой улучшаются упруго-прочностные свойства цементного камня, т. к. прочность цементно-эпоксидного камня будет определяться синергетическим действием клинкерных минералов, эпоксидной смолы и диспергируемого в воде латекса.

По исследованиям компании Халлибуртон Интернэшнл ГмбХ использование смол в составе цементного камня снижает его проницаемость до $0,015 \text{ мД}$ при открытой пористости по газу около 22 %, что благоприятно сказывается на герметичности крепи, особенно в условиях цементирования скважин с высокой вероятностью флюидопроявления [31, 32].

Таблица. Результаты экспериментальных исследований

Table. Results of experimental studies

Состав цементного раствора Slurry design	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	Водоотдача API, мл Fluid loss API, ml	Прочность на сжатие/изгиб, МПа Compressive/flex ural strength, MPa	Динамический модуль Юнга, ГПа Dynamic Young's modulus, GPa	Динамический коэффициент Пуассона Dynamic Poisson's ratio
ЦР-1 ВЦ 0,5; замедлитель – 0,2%; регулятор водоотдачи – 0,25%; пеногаситель – 0,2% Slurry 1, WR 0,5; retarder – 0,2%; fluid loss agent – 0,25 %, defoamer – 0,2 %	1,84	48	27,45/6,03	18,43	0,15
ЦР-2 ВЦ 0,47; замедлитель – 0,2%; регулятор водоотдачи – 0,25%; пеногаситель – 0,2%; смола – 4,11%; отвердитель – 0,41% Slurry 2, WR 0,47; retarder – 0,2%; fluid loss agent – 0,25 %, defoamer – 0,2 %; epoxy resin – 4,11 %; hardener – 0,41 %	1,84	51	24,14/5,31	13,89	0,23
ЦР-3 ВЦ 0,44; замедлитель – 0,2%; регулятор водоотдачи – 0,25%; пеногаситель – 0,2%; смола – 7,92%; отвердитель – 0,79% Slurry 3, WR 0,44; retarder – 0,2%; fluid loss agent – 0,25 %, defoamer – 0,2 %; epoxy resin – 7,92 %; hardener – 0,79 %	1,84	56	34,45/6,88	11,31	0,27
ЦР-4 ВЦ 0,43; замедлитель – 0,2%; регулятор водоотдачи – 0,25%; пеногаситель – 0,2%; смола – 11,9%; отвердитель – 1,19% Slurry 4, WR 0,43; retarder – 0,2%; fluid loss agent – 0,25 %, defoamer – 0,2 %; epoxy resin – 11,9 %; hardener – 1,19 %	1,84	55	26,05/8,07	9,83	0,25
ЦР-5 ВЦ 0,47; замедлитель – 0,2%; регулятор водоотдачи – 0,25%; пеногаситель – 0,2%; смола – 4,11%; отвердитель – 0,41%; латекс – 1% Slurry 5, WR 0,47; retarder – 0,2%; fluid loss agent – 0,25 %, defoamer – 0,2 %; epoxy resin – 4,11 %; hardener – 0,41 %; latex – 1 %	1,84	47	32,81/7,86	9,52	0,28
ЦР-6 ВЦ 0,44; замедлитель – 0,2%; регулятор водоотдачи – 0,25%; пеногаситель – 0,2%; эластомер – 5% Slurry 6, WR 0,44; retarder – 0,2%; fluid loss agent – 0,25 %, defoamer – 0,2 %; elastomer – 5 %	1,84	49	24,67/6,54	11,12	0,26

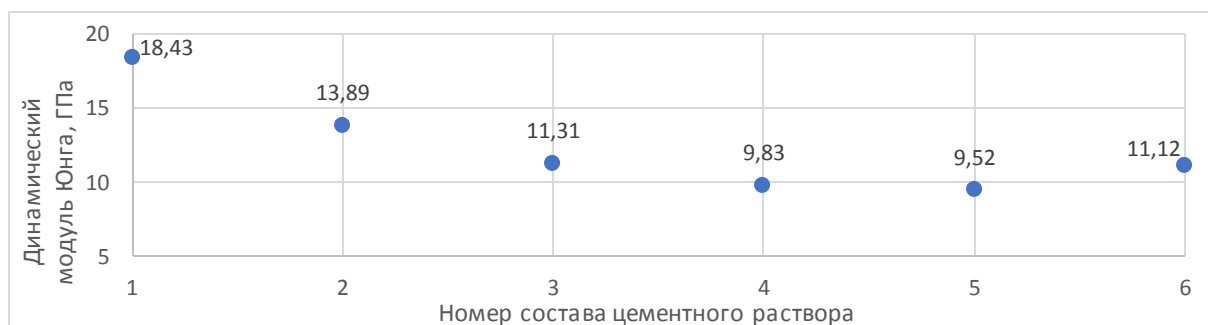


Рис. 3. Изменение динамического модуля Юнга

Fig. 3. Changing the dynamic Young's modulus

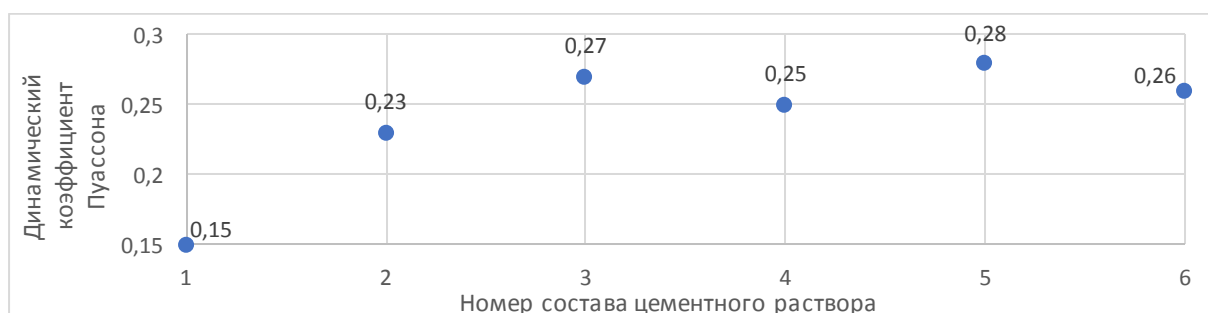


Рис. 4. Изменение динамического коэффициента Пуассона

Fig. 4. Changing the dynamic Poisson's ratio

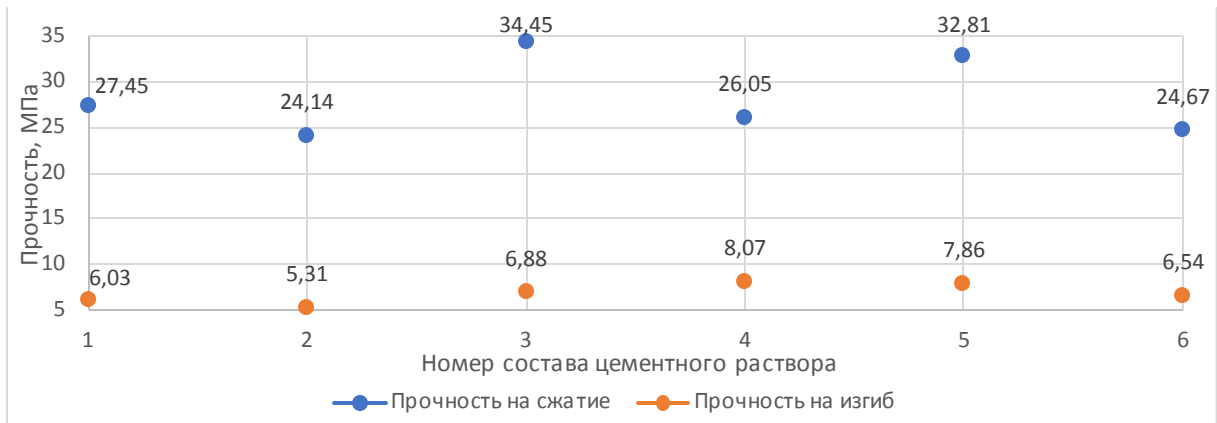


Рис. 5. Прочностные свойства состава цементных камней

Fig. 5. Strength properties of the composition of cement stones

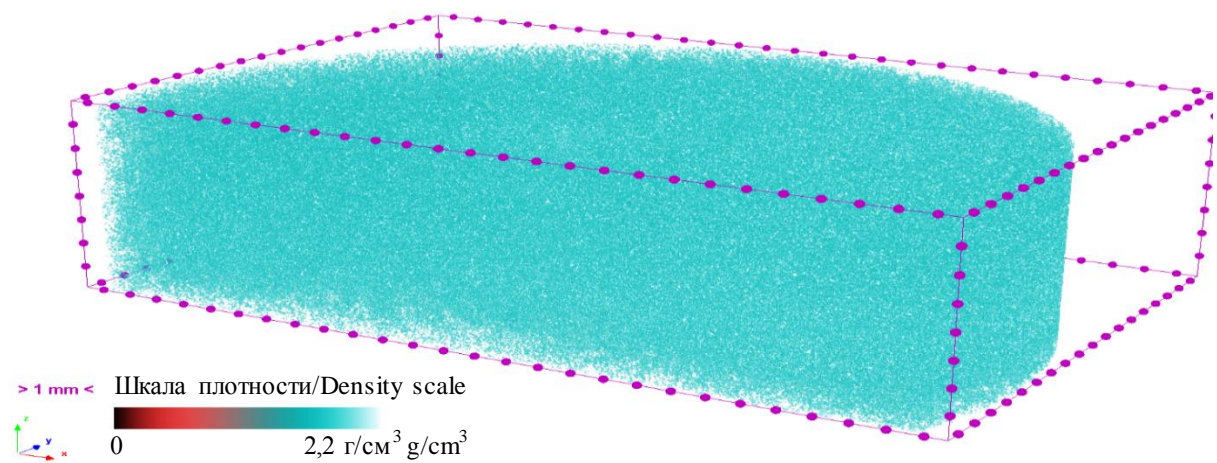


Рис. 6. Порное пространство базового цементного камня № 1 (ЦР-1)

Fig. 6. Pore space of the base cement stone no. 1 (Cement Slurry-1)

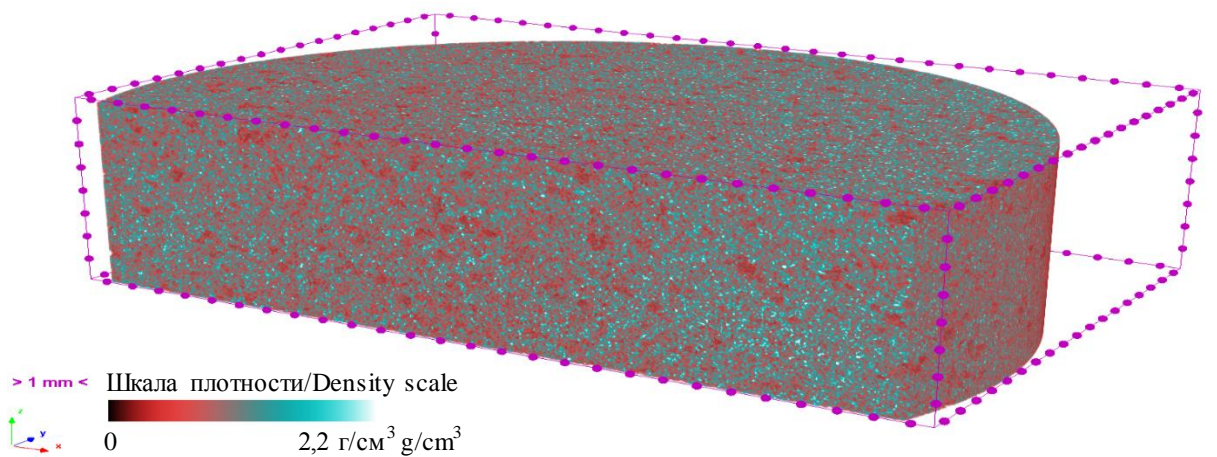


Рис. 7. Порное пространство базового цементного камня № 1 (ЦР-5)

Fig. 7. Pore space of the base cement stone no. 1 (Cement Slurry-5)

Выводы

К выводам работы можно отнести:

- 1) эпоксидная смола эффективно улучшает упругие свойства цементного камня, при этом увеличивая прочность образца на изгиб, до концентрации 10 % (ЦР-2, ЦР-3, ЦР-5);
- 2) при превышении концентрации 10 % смолы в составе цементного раствора отмечается частичное ухудшение прочностных свойств цементного камня на сжатие и увеличение прочностных свойств цементного камня на изгиб, при этом отмечается увеличение упругих свойств (ЦР-4);

- 3) наилучшими показателями обладает ЦР-5, в котором прослеживается совместное действие смолы и диспергируемого латекса в минимальных концентрациях, так, динамический модуль Юнга снижен на 14 %, коэффициент Пуассона незначительно снижен на 7,5 % относительно существующего отраслевого решения (ЦР-6); относительно базового цементного раствора без эластификаторов (ЦР-1) можно отметить снижение динамического модуля Юнга на 51,65 % и увеличение динамического коэффициента Пуассона на 53,57 %;
- 4) использование смолы в составе цементного раствора также снижает проницаемость цементного камня, благоприятно сказываясь на герметичности крепи. Дальнейшая работа сосредоточена на создании модели, базирующейся на методе конечных элементов, для проверки применимости разработанных цементных смесей.

Особую благодарность авторский коллектив выражает центру «Геомеханики и проблем горного производства» Санкт-Петербургского горного университета за содействие экспериментальным исследованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики / В.С. Литвиненко, П.С. Цветков, М.В. Двойников, Г.В. Буслев // Записки Горного института. – 2020. – Т. 244. – С. 428–438.
2. Tsvetkov P.S., Cherepovitsyn A.E., Makhovikov A.B. Economic assessment of heat and power generation from small-scale liquefied natural gas in Russia // Energy Reports. – 2020. – V. 6. – P. 391–402.
3. Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V., Trushko V.L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas International // Journal of Mining Science and Technology. – 2021. – V 32. – P. 113–119.
4. Litvinenko V.S. The role of hydrocarbons in the global energy agenda: the focus on liquefied // Natural Gas Resources. – 2020. – V. 5. – P. 59–81.
5. Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Molodtsov K.V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector EURASIAN MINING // Business and International Management. – 2020. – V. 1. – P. 36–41.
6. Литвиненко В.С., Двойников М.В. Методика определения параметров режима бурения наклонно-прямолинейных участков скважины винтовыми забойными двигателями // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 105–112.
7. Литвиненко В.С., Двойников М.В. Обоснование выбора параметров режима бурения скважин роторными управляемыми системами // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. – С. 24–29.
8. Dynamic response of multi-scale geophysical systems: waves and practical applications / A.A. Yakovleva, I.B. Movchan, Z.I. Shaygallyamova // Philosophical Transaction of Royal Society A. – 2022. – V. 380. – P. 20210403.
9. Modelling of seismic assessment for large geological systems / I.B. Movchan, A.A. Yakovleva, V. Frid, A.B. Movchan, Z.I. Shaygallyamova // Philosophical Transaction of Royal Society A. – 2022. – V. 380. – P. 20210393.
10. Features of fracture height propagation in cross-layer fracturing of shale oil reservoirs / Y. Wang, B. Hou, D. Wang, L.A. Zhenhua // Petroleum Exploration and Development. – 2021. – V. 48. – P. 469–479.
11. Николаев Н.И., Леушева Е.Л. Тампонажные составы пониженной плотности для цементирования скважин в условиях anomalно низких пластовых давлений // Записки Горного института. – 2019. – Т. 236. – С. 194–200.
12. Анализ и выбор тампонажной смеси устойчивой к динамическим нагрузкам, с целью повышения качества герметичности крепи в затрубном пространстве / П.А. Блинов, А.В. Шаньширов, Д.М. Черемшанцев, Н.Ю. Кузнецова, В.В. Никишин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – С. 115–123.
13. Гендлер С.Г., Фазылов И.Р., Абашин А.Н. Результаты экспериментальных исследований теплового режима нефтяных шахт при термическом способе добычи нефти // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – Т. 6. – С. 248–262.
14. Effects of confinement pressure on the mechanical behavior of an oil well cement paste / V.N. Lima, F. Silva, H.J. Skadsem, K. Beltrán-Jiménez, J.K. Sunde // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – V. 208. – P. 109769.
15. The influence of fine aggregates on Portland cement mortar compressive strength / A. Muciño, S. Vargas, N.A. Pérez, L. Bucio, E. Orozco // Results in Materials. – 2021. – V. 10. – P. 100182.
16. Physio-chemical interaction of Ethylene-Vinyl Acetate copolymer on bonding ability in the cementing material used for oil and gas well / S.T. Lanka, N.G. Anak Moses, R.R. Suppiah, B.T. Maulianda // Petroleum Research. – 2021. – V. 7. – P. 341–349.
17. Elastic and thermodynamic properties of the major clinker phases of Portland cement: insights from first principles calculations / N.L. Mai, N.H. Hoang, H.T. Do, M. Pilz, T.T. Trinh // Construction and Building Materials. – 2021. – V. 287. – P. 122873.
18. Shen X., Zhang P. A calculation method for the allowable fracturing injection pressure of preventing casing deformation // Natural Gas Industry B. – 2019. – V. 6. – P. 384–393.
19. Hydraulic fracturing induced casing shear deformation and a prediction model of casing deformation / Q. Lu, Z. Liu, J. Guo, L. He, Y. Li, J. Zeng, S. Ren // Petroleum Exploration and Development. – 2021. – V. 48. – P. 460–468.
20. Impact of down hole pressure and fluid-access on the effectiveness of wellbore cement expansion additives / T.K.T. Wolterbeek, E.K. Cornelissen, S.J.T. Hangx, C.J. Spiers // Cement and Concrete Research. – 2021. – V. 147. – P. 106514.
21. Effect of epoxy resin emulsion on the mechanical properties of oil well cement-based composites / M. He, J. Song, M. Xu, L. He, P. Xu // Advances in Civil Engineering. – 2020. – V. 2020. – P. 1–9.
22. Губайдуллин А.Г., Моргучев А.И. Расчет упруговязкопластического перемещения стенок скважин в трансверсально-изотропных горных породах // Записки Горного института. – 2019. – Т. 236. – С. 180–184.
23. Агзамов Ф.А., Белоусов А.О. Комплексный подход к предупреждению нарушения герметичности затрубного пространства скважин при вторичном вскрытии и ГРП // Нефтяная провинция. – 2019. – Т. 1. – С. 197–214.
24. Агзамов Ф.А., Белоусов А.О., Комлев Я.К. Применение упругого цементного камня для повышения устойчивости крепи скважин при ударных и динамических нагрузках // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – Т. 2. – С. 9–19.
25. 10B-2/ISO 10426-2. Recommended Practice for Testing Well Cements. – R.: API, 2005. – 11 p.
26. ГОСТ 1581-2019 Портландцементы тампонажные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2020. – 11 с.
27. ГОСТ 17624-2012 Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
28. A study on the hydraulic aperture of microannuli at the casing-cement interface using a large-scale laboratory setup / A. Moghadam, K. Castelein, J. Heege, B. Orlig // Geomechanics for Energy and the Environment. – 2022. – V. 29. – P. 100269.
29. Mechanical properties and enhancement mechanism of oil-well cement stone reinforced with carbon fiber surfaces treated by concentrated nitric acid and sodium hypochlorite / Y. Ye, F.J. Zhang, C. Qi, F. Li, M. Yang, J. Yang // International Journal of Polymer Science. – 2020. – V. 2020. – P. 1–10.
30. Zhang M., Jivkov A.P. Micro mechanical modelling of deformation and fracture of hydrating cement paste using X-ray computed tomography characterization // Composites Part B: Engineering. – 2016. – V. 88. – P. 64–72.
31. Applying a resin-cement system to help prevent fluid migration in the annulus: case study, Western Siberia / M. Baklushin,

- N. Velikaya, V. Zyryanov, D. Vologdin // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, 2019. – P. 1–10.
32. Sadykov M.I., Blinov P.A., Nutskova M.V. Use of the water-swallowable polymers (WSP) for wellbore stabilization in intensely fractured rock intervals // E3S Web of Conferences. – 2021. – V. 266. – P. 01013.

*Поступила 09.11.2022 г.
Прошла рецензирование 07.12.2022 г.*

Информация об авторах

Блинов П.А., кандидат технических наук, доцент кафедры бурения скважин Санкт-Петербургского горного университета.

Садыков М.И., аспирант кафедры бурения скважин Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 622.245.422.2

EVALUATION OF ELASTIC-STRENGTH PROPERTIES OF CEMENT-EPOXY SYSTEMS

Pavel A. Blinov¹,
Blinov_PA@pers.spmi.ru

Marat I. Sadykov¹,
s205064@stud.spmi.ru, marat.sadykov96@gmail.com

¹ St. Petersburg Mining University,
21 line 2, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.

The relevance of the study is determined by the conditions of operation and completion of wells in modern conditions. In the process of well construction, the plugging material used to fasten casing strings experiences dynamic loads, as a result of which it loses its integrity, which leads to leakage of the annulus and subsequent crossflows of formation fluids. Dynamic loads include the dynamics of the drilling tool during normalization, operations for secondary opening, hydraulic fracturing, casing pressure testing after the waiting period for the cement stone to harden. The elastic properties of cement stone from various compositions were determined using ultrasonic evaluation methods, the strength properties were determined by destructive testing methods according to API 10B-2 / ISO 10426-2 standards. There are a number of works and industry solutions of well cementing contractors related to the creation of elastic cement systems, however, in many respects, these developments do not fully solve the identified problems and are dependent on imported components.

The main aim: development of the composition of a cement slurry with increased elastic-strength properties from Russian components.

Object: cement stone and its elastic-strength properties.

Results. In the course of experimental studies, an increase in the bending strength and improvement in the elastic properties of cement-epoxy stone are noted when using epoxy resin as part of the cement system, the distribution of the resin in the composition of the cement stone using 3D X-ray scanning methods is determined, the advantages and disadvantages of additives-elasticizers are noted, concentrations of additives that improve the technological properties of cement mortar and stone are selected.

Key words:

cement stone, Young's modulus, Poisson's ratio, ultrasound, compressive strength, flexural strength, permeability, elastic cements, elasticizers.

The team of authors is especially grateful to the Center for Geomechanics and Mining Problems of St. Petersburg Mining University for their assistance in experimental research.

REFERENCES

- Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Dvoynikov M.V., Buslaev G.V. Barriers to the implementation of hydrogen initiatives in the context of sustainable development of global energy. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 244, pp. 428–438. In Rus.
- Tsvetkov P.S., Cherepovitsyn A.E., Makhovikov A.B. Economic assessment of heat and power generation from small-scale liquefied natural gas in Russia. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 391–402.
- Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V., Trushko V.L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, vol. 32, pp. 1–1.
- Litvinenko V.S. The role of hydrocarbons in the global energy agenda: the focus on liquefied. *Natural Gas Resources*, 2020, vol. 5, pp. 59–81.
- Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Molodtsov K.V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector EURASIAN MINING. *Business and International Management*, 2020, vol. 1, pp. 36–41.
- Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V. Method for determining the parameters of the drilling mode of inclined straight sections of the well with screw downhole motors. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 241, pp. 105–112. In Rus.
- Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V. Justification of the choice of parameters for drilling wells with rotary controlled systems. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 235, pp. 24–29. In Rus.
- Yakovleva A.A., Movchan I.B., Shaygallyamova Z.I. Dynamic response of multi-scale geophysical systems: waves and practical applications. *Philosophical Transaction of Royal Society A*, 2022, vol. 380, pp. 20210403.
- Movchan I.B., Yakovleva A.A., Frid V., Movchan A.B., Shaygallyamova Z.I. Modelling of seismic assessment for large geological systems. *Philosophical Transaction of Royal Society A*, 2022, vol. 380, pp. 20210393.
- Wang Y., Hou B., Wang D., Zhenhua L.A. Features of fracture height propagation in cross-layer fracturing of shale oil reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, vol. 48, pp. 469–479.
- Nikolaev N.I., Leusheva E.L. Low-density cementing compositions for well cementing under conditions of abnormally low formation pressures. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 236, pp. 194–200. In Rus.
- Blinov P.A., Shansherov A.V., Cheremshantsev D.M., Kuznetsova N.Yu., Nikishin V.V. Analysis and selection of a cement mixture resistant to dynamic loads, in order to improve the quality of the tightness of the lining in the annulus. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, pp. 115–123. In Rus.
- Gendler S.G., Fazylov I.R., Abashin A.N. The results of experimental studies of the thermal regime of oil mines in the thermal method of oil production. *Mining informational and analytical bulletin*, 2022, vol. 6, pp. 248–262. In Rus.
- Lima V.N., Silva F., Skadsem H.J., Beltrán-Jiménez K., Sunde J.K. Effects of confinement pressure on the mechanical behavior of an oil well cement paste. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208, pp. 109769.
- Muciño A., Vargas S., Pérez N.A., Bucio L., Orozco E. The influence of fine aggregates on Portland cement mortar compressive strength. *Results in Materials*, 2021, vol. 10, pp. 100182.
- Lanka S.T., Anak Moses N.G., Suppiah R.R., Maulianda B.T. Physio-chemical interaction of Ethylene-Vinyl Acetate copolymer on bonding ability in the cementing material used for oil and gas well. *Petroleum Research*, 2021, vol. 7, pp. 341–349.
- Mai N.L., Hoang N.H., Do H. T., Pilz M., Trinh T.T. Elastic and thermodynamic properties of the major clinker phases of Portland cement: insights from first principles calculations. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 287, pp. 122873.
- Shen X., Zhang P. A calculation method for the allowable fracturing injection pressure of preventing casing deformation. *Natural Gas Industry B*, 2019, vol. 6, pp. 384–393.

19. Lu Q., Liu Z., Guo J., He L., Li Y., Zeng J., Ren S. Hydraulic fracturing induced casing shear deformation and a prediction model of casing deformation. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, vol. 48, pp. 460–468.
20. Wolterbeek T.K.T., Cornelissen E.K., Hangx S.J.T., Spiers C.J. Impact of downhole pressure and fluid-access on the effectiveness of wellbore cement expansion additives. *Cement and Concrete Research*, 2021, vol. 147, pp. 106514.
21. He M., Song J., Xu M., He L., Xu P. Effect of epoxy resin emulsion on the mechanical properties of oil well cement-based composites. *Advances in Civil Engineering*, 2020, vol. 2020, pp. 1–9.
22. Gubaydullin A.G., Moguchev A.I. Calculation of elastoviscoplastic displacement of borehole walls in transversally isotropic rocks. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 236, pp. 180–184. In Rus.
23. Agzamov F.A., Belousov A.O. An integrated approach to the prevention of violations of the integrity of the annular space of wells during the secondary opening and hydraulic fracturing. *Oil province*, 2019, vol. 1, pp. 197–214. In Rus.
24. Agzamov F.A., Belousov A.O., Komlev Ya.K. The use of elastic cement stone to increase the stability of well lining under shock and dynamic loads. *Problems of collection, preparation and transportation of oil and oil products*, 2020, vol. 2, pp. 9–19. In Rus.
25. 10B-2/ISO 10426-2. *Recommended Practice for Testing Well Cements*. R., API, 2005, 11 p.
26. GOST 1581-2019. *Portland cementy tamponazhnye. Tekhnicheskie usloviya* [State Standart 1581-2019. Portland cements are grouting. Specifications]. Moscow, StandartInform Publ., 2020. 11 p.
27. GOST 17624-2012 *Betony. Ultrazvukovoy metod opredeleniya prochnosti* [State Standart 17624-2012. Concrete. Ultrasonic method for determining strength]. Moscow, StandartInform Publ., 2014. 20 p.
28. Moghadam A., Castelein K., Heege J., Orlic B. A study on the hydraulic aperture of microannuli at the casing–cement interface using a large-scale laboratory setup. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2022, vol. 29, pp. 100269.
29. Ye Y., Zhang F.J., Qi C., Li F., Yang M., Yang J. Mechanical properties and enhancement mechanism of oil-well cement stone reinforced with carbon fiber surfaces treated by concentrated nitric acid and sodium hypochlorite. *International Journal of Polymer Science*, 2020, vol. 2020, pp. 1–10.
30. Zhang M., Jivkov A. P. Micromechanical modelling of deformation and fracture of hydrating cement paste using X-ray computed tomography characterization. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 88, pp. 64–72.
31. Baklushin M., Velikaya N., Zyryanov V., Vologdin D. Applying a resin-cement system to help prevent fluid migration in the annulus: case study, Western Siberia. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, 2019. pp. 1–10.
32. Sadykov M.I., Blinov P.A., Nutskova M.V. Use of the water-swelling polymers (WSP) for wellbore stabilization in intensely fractured rock intervals. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 266, pp. 01013.

Received: 9 November 2022.

Reviewed: 7 December 2022.

Information about the authors

Pavel A. Blinov, Cand. Sc., associate professor, St. Petersburg Mining University.

Marat I. Sadykov, post-graduate student, St. Petersburg Mining University.

УДК 556.314.6(282.256.1)

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗЕЙ РЕЧНЫХ И ГРУНТОВЫХ ВОД В БАССЕЙНЕ СРЕДНЕЙ ОБИ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Савичев Олег Геннадьевич¹,
OSavichev@mail.ru

Лобурь Яна Николаевна¹,
ynl5@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Понимание механизмов и закономерностей изменения подземного стока, условий взаимодействия подземных, речных и болотных вод бассейна реки Оби в целом и Томской области в частности необходимо для прогнозирования изменений водных ресурсов региона и планирования мероприятий по их комплексному использованию и охране.

Цель: количественная оценка взаимосвязей речных и подземных вод в среднем течении реки Оби (Томская область) по результатам определения отношения инфильтрации к коэффициенту фильтрации и положения уровней грунтовых вод на водоразделах рек.

Методы: статистические методы, методы математического моделирования.

Результаты и выводы. Выполнен анализ данных многолетних гидрологических (22 поста на реке Оби и её притоках) и гидрогеологических (14 гидрогеологических скважин) наблюдений на территории Томской области за период с 1960-х по 2005–2015 гг. Показано, что инфильтрация в целом снижается во время половодья, причем на водоразделах дольше и более плавно, чем в речных долинах. Внутригодовое изменение отношения инфильтрации к коэффициенту фильтрации в большинстве случаев обратно пропорционально изменению среднего значения слоя водного стока смежных рек. Выполнена количественная оценка внутригодовых изменений положения водоразделов рек. Наиболее существенные изменения выявлены на границе между реками Обью и Васюган (скважина 124р), Обью и Шегаркой (63р), Чулым и Кией (81р). Сделан вывод о том, что граница водосборов должна рассматриваться не как линия, а как полоса. Получены подтверждения регионального подземного стока не только вдоль рек, но и в меридиональном направлении (примерно с юга на север).

Ключевые слова:

подземные и речные воды, Средняя Обь, отношение инфильтрации к коэффициенту фильтрации, уровеньный режим.

Введение

В Западной Сибири в голоцене произошли значительные изменения климата и гидросферы [1–4], причём в настоящее время продолжается интенсивное заболачивание этой территории в пределах таёжной зоны [5, 6]. Это обуславливает актуальность исследований в области прогнозирования изменений окружающей среды и повышения безопасности и надёжности технических компонентов природно-техногенных комплексов [1, 7] и определяет их общую цель – выявление закономерностей изменения подземного стока и условий взаимодействия подземных, речных и болотных вод бассейна реки Оби в голоцене. Предполагается, что наличие подобных знаний позволит оценить направление эволюции болотных экосистем Западной Сибири, уточнить сценарии изменения крупных природно-техногенных комплексов и выработать рекомендации по повышению надёжности и безопасности технических систем, функционирующих в условиях сильной заболоченности и подтопления прилегающих территорий. Ниже эта цель рассмотрена применительно к условиям формирования речных и подземных вод верхней гидродинамической зоны в бассейне р. Обь на участке её среднего течения в пределах Томской области Российской Федерации.

Объекты и методика исследования

Объектами исследования являются непосредственно Обь и её притоки (характеристика рек приве-

дена в [8]) – реки Тым, Кеть с притоком Пайдугина, Чулым с притоком Кия, Томь с притоками Ушайка и Басандайка, Шегарка, Чая с притоками Бакчар и Галка (приток реки Бакчар), Чузык (приток реки Парабель), Васюган с притоком Чижарка (рис. 1, табл. 1), и предположительно связанные с ними подземные воды верхней гидродинамической зоны, преимущественно грунтовые отложения четвертичного возраста (рис. 1, табл. 2, скважины 124р, 89р, 137р, 445р, 110р, 95р, 81р), частично – артезианские подземные воды отложений палеогенового (167р, 63р, 156р, 113р, 129р) или неогенового (113р, 94р) возраста, в определенной мере связанные с грунтовыми водами четвертичных отложений (с учётом литологии и характера внутригодового изменения уровней подземных вод [9]). Скважина 18р расположена на северной границе Алтае-Саянской гидрогеологической складчатой области, прочие скважины – в пределах Западно-Сибирского артезианского бассейна [10–14].

Источниками информации послужили данные многолетних наблюдений Росгидромета и материалы государственного мониторинга недр на территории Томской области (в разное время – Томская геолого-разведочная экспедиция, АО «Томскгеомониторинг» и Сибирский региональный центр ФГБУ «Гидроспецгеология») за период с начала 1960-х по 2005–2015 гг. (с учетом прекращения наблюдения на ряде постов и скважин), в обобщенной форме опубликованные в [9, 13–15] (более подробная информация приведена в указанных источниках).

Таблица 1. Среднегодовое месячные уровни речных вод на территории Томской области, м (в Балтийской системе высот)

Table 1. Average annual monthly river water levels in the Tomsk region, m (in the Baltic elevation system)

№	Река/River	Пункт/Locality	Месяц/Month											
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	Обь/Ob	Победа/Pobeda	72,29	72,25	72,43	73,58	73,97	73,84	73,28	72,67	72,20	71,97	72,16	72,50
2		Могочино/Mogochino	58,69	58,43	58,32	60,81	64,65	63,55	60,93	59,65	58,99	59,02	59,44	59,31
3		Прохоркино/Prokhorkino	40,70	40,42	40,29	41,38	46,04	46,21	43,85	41,72	41,05	40,97	41,55	41,39
4		Александровское/Aleksandrovskoe	34,19	33,78	33,64	34,59	39,89	40,83	38,67	35,77	34,88	34,73	35,19	34,89
5	Томь/Tom	Томск, г/с/Tomsk, h/s	70,35	70,01	69,91	72,61	74,21	72,08	70,41	70,06	70,06	70,44	70,89	70,66
6	Басандайка/Basandaika	Басандайка/Basandaika	81,43	81,48	81,59	82,01	81,75	81,36	81,25	81,22	81,23	81,28	81,35	81,41
7	Ушайка/Ushayka	Степановка/Stepanovka	79,60	79,65	79,73	80,03	79,80	79,45	79,34	79,33	79,31	79,37	79,49	79,55
8	Чулым/Chulym	Тегульдэт/Teguldet	124,44	124,35	124,30	125,07	127,67	126,90	125,50	124,83	124,56	124,50	124,65	124,67
9		Зырянское/Zyryanskoe	97,29	97,13	97,09	98,11	101,50	100,52	98,58	97,73	97,45	97,46	97,65	97,60
10		Батурино/Baturino	74,70	74,53	74,43	75,12	78,64	77,97	75,71	74,88	74,63	74,64	74,91	74,94
11	Кня/Кня	Окунеево/Okunevo	100,44	100,37	100,38	101,82	104,85	102,67	100,76	100,50	100,53	100,76	101,01	100,71
12	Четь/Chet	Конторка/Kontorka	119,83	119,86	119,90	120,49	122,95	120,70	119,82	119,65	119,55	119,60	119,86	119,80
13	Кеть/Ket	Белый Яр*/Bely Yar*	65,18	65,15	65,17	65,37	67,19	68,36	66,68	65,24	64,99	64,98	65,33	65,35
14	Пайдугина/Paidugina	Берёзовка/Berezovka	75,12	75,12	75,16	75,16	77,11	76,33	75,15	74,82	74,87	75,63	75,49	75,23
15	Тым/Tym	Напас/Naras	63,35	63,32	63,32	63,49	65,48	66,15	64,17	63,58	63,45	63,47	63,75	63,53
16	Шегарка/Shegarka	Бабарькино/Babarykino	89,23	89,21	89,18	90,75	93,02	90,31	89,78	89,70	89,57	89,56	89,39	89,24
17	Чая/Chaya	Подгорное/Podgomoe	62,60	62,61	62,62	63,21	66,13	64,47	62,94	62,54	62,45	62,53	62,91	62,72
18	Бакчар/Bakchar	Польнянка/Polnyanka	95,91	95,86	95,84	96,59	98,18	96,82	96,19	96,16	96,17	96,21	96,15	96,00
19	Галка/Galka	Бакчар/Bakchar	92,86	92,83	92,81	93,45	94,80	93,65	92,98	92,99	92,94	93,01	92,88	92,87
20	Чузык/Chuzik	Пудино/Pudino	79,62	79,59	79,57	80,01	82,88	80,74	79,96	79,76	79,74	79,84	79,86	79,68
21	Чижанка/Chizhanka	Лавровка**/Lavrovka**	89,35	89,33	89,33	89,47	90,61	90,51	89,84	89,59	89,58	89,57	89,50	89,42
22	Васюган/Vasyugan	Средний Васюган/Sredny Vasyugan	53,69	53,59	53,55	54,33	58,27	58,16	55,54	54,37	54,26	54,27	54,40	53,95

Примечание: номер объекта соответствует рис. 1; * значения среднемесячных уровней воды р. Кеть в створе п. Белый Яр получены линейной интерполяцией в зависимости от площади водосбора между створами у с. Максимкин Яр и с. Родионовка, на р. Томи у с. Батурино – между створами у с. Поломошное и г. Томск (гидрологический створ); ** уровни воды р. Чижанки в районе урочища Лавровка рассчитаны согласно [18] по варианту отсутствия данных наблюдений (использование полиномиальной зависимости между уровнями и расходами воды по уравнениям Шеши–Маннинга и зависимости между среднемесячными расходами р. Чижанки $Q_{чл}$ и р. Васюган у с. Средний Васюган $Q_{всв}$: $Q_{чл} = (0,308 \pm 0,012) Q_{всв} (F_{чл}/F_{члч})$, где $F_{чл}$ и $F_{члч}$ – площади водосборов р. Чижанки в створе Лавровки и Усть-Чурульки).

Note: object number corresponds to Fig. 1; * values of average monthly water levels of the Ket river near the Bely Yar village were obtained by linear interpolation depending on the catchment area between the cross-sections at the Maksimkin Yar village and the Rodionovka village, on the Tom river near the Baturino village were between the cross-sections at the Polomoshnoe village and Tomsk (hydrological section near the Lagerny Sad area); ** water levels of the Chizhanka river nearby the Lavrovka (uninhabited) were calculated by [18] according to the variant of the absence of observational data (using the polynomial dependence between water levels and discharges according to the Shezy–Manning equations and the dependence between the average monthly discharges of the Chizhanka river $Q_{чл}$ and the Vasyugan river near the Middle Vasyugan village $Q_{всв}$: $Q_{чл} = (0,308 \pm 0,012) Q_{всв} (F_{чл}/F_{члч})$, where $F_{чл}$ and $F_{члч}$ are the catchment areas of the Chizhanka river at the Lavrovka and Ust-Churulka sites).

Таблица 2. Среднегодовое месячные уровни подземных вод на территории Томской области, м (в Балтийской системе высот)

Table 2. Average annual monthly groundwater levels in the Tomsk region, m (in the Baltic elevation system)

Скважина/Well	Пункт/Locality	Возраст отложений/Age of deposits	Месяц/Month											
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
124p	Александровское/Aleksandrovskoe	1QIII	37,22	36,88	36,68	36,99	39,53	41,08	40,39	38,69	38,01	37,75	37,84	37,60
167p	Средний Васюган/Sredny Vasyugan	P ₂ tv	60,69	60,72	60,74	60,81	61,51	61,50	60,75	60,57	60,55	60,61	60,68	60,68
89p	Каргала/Kargala	aQ _{mb}	99,18	98,95	99,19	99,38	99,88	99,52	99,77	99,59	99,36	99,31	99,28	99,27
63p	Мельниково/Melnikovo	2aQ _{III} +P _{3II}	78,58	78,54	78,53	78,79	78,99	78,91	78,79	78,71	78,65	78,66	78,65	78,62
137p	Тегульдэт/Teguldet	aQ _{IV}	127,32	127,18	127,17	127,24	127,66	127,99	127,91	127,74	127,62	127,48	127,45	127,41
18p	Предтеченск/Predtechensk	aIQ _{кк} +P _{3nm}	142,70	142,72	142,68	142,87	142,94	142,96	142,93	142,89	142,81	142,80	142,79	142,73
445p	Чернышёвка/Chernyshevka	aIQ _{кк} +aIQ _{кб}	100,60	100,51	100,59	100,55	100,76	100,79	100,85	100,80	100,74	100,76	100,69	100,56
110p	Бакчар/Bakchar	aQ _{mb}	102,21	102,16	102,21	102,20	102,45	102,44	102,46	102,44	102,38	102,42	102,39	102,33
156p	Напас/Naras	P _{3lg}	63,89	63,89	63,88	64,03	65,66	66,51	64,83	64,21	64,02	64,06	64,17	64,03
113p	Белый Яр/Bely Yar	N ₁	76,39	76,26	76,19	76,19	76,38	76,76	76,82	76,73	76,62	76,56	76,50	76,46
95p	Подгорное/Podgomoe	aQ _{mb}	69,68	69,66	69,64	69,65	69,77	69,97	69,98	69,90	69,78	69,75	69,74	69,72
81p	Зырянское/Zyryanskoe	1QIII	99,20	99,04	98,93	99,08	100,72	101,54	100,70	100,08	99,68	99,47	99,39	99,36
94p	Подгорное/Podgomoe	N ₁	63,94	63,90	63,85	63,95	64,79	65,22	64,81	64,45	64,22	64,07	64,07	64,01
129p	Пудино/Pudino	P _{3lg}	87,07	87,00	86,96	87,08	87,39	87,41	87,30	87,21	87,18	87,14	87,15	87,27

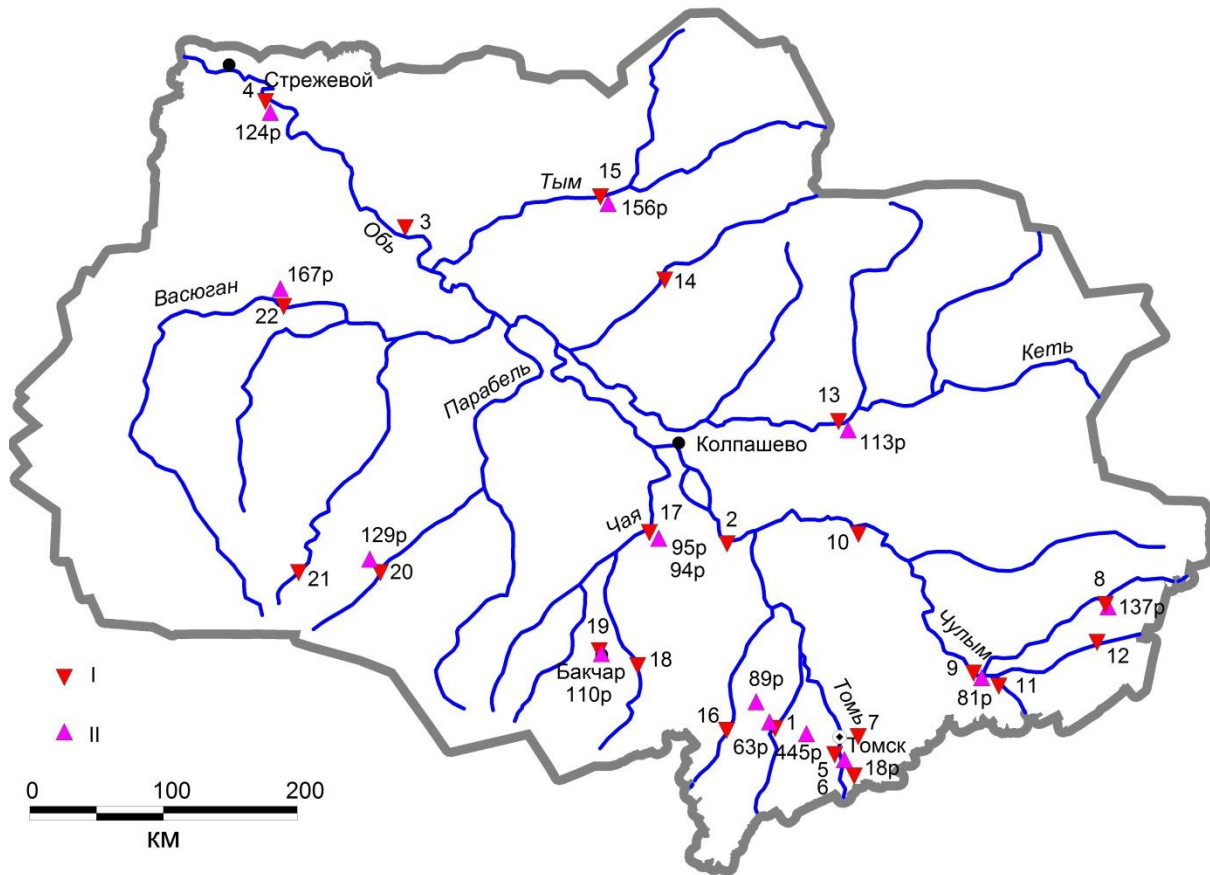


Рис. 1. Схема расположения пунктов многолетних гидрологических (I) и гидрогеологических (II) наблюдений, которые были использованы для анализа

Fig. 1. Layout of the points of long-term hydrological (I) and hydrogeological (II) observations that were used for analysis

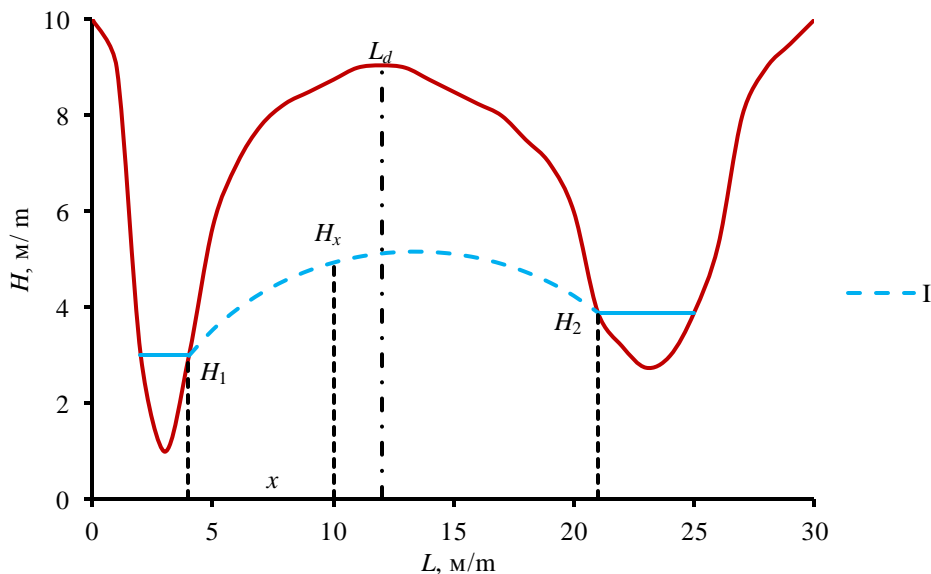


Рис. 2. Схема расчета уровней грунтовых вод (I) между реками: H_1 – уровень воды в реке № 1; H_2 – уровень воды в реке № 2; H_x – уровень грунтовых вод на расстоянии x от уреза реки № 1; L_d – положение водораздела между реками № 1 и 2 относительно реки № 1

Fig. 2. Scheme for calculating groundwater levels (I) between rivers: H_1 is the water level in river no. 1; H_2 is the water level in river no. 2; H_x is the groundwater level at a distance x from the river's edge no. 1; L_d is the position of the watershed between rivers no.1 and 2 relative to river no. 1

Методика исследования основана на допущении, в соответствии с которым движение грунтовых вод в среднем за месячные интервалы рассматривается как условно стационарный процесс, описываемый уравнением Дюпюи с учетом инфильтрации. При этом уровни грунтовых вод междуречий могут быть ориентировочно оценены по уравнению (1), отношение K_I инфильтрации Inf к (среднему по разрезу) коэффициенту фильтрации K_f – по уравнению (2), а положение водораздела L_d – по уравнению (3) [16, 17]:

$$H_{x,i} = \sqrt{H_1^2 - \frac{H_1^2 - H_2^2}{L_{12}} \cdot x + \frac{Inf}{K_f} \cdot (L_{12} - x) \cdot x}, \quad (1)$$

$$K_I = \frac{Inf}{K_f} = \frac{H_x^2 - H_1^2}{(L_{12} - x) \cdot x} + \frac{H_1^2 - H_2^2}{(L_{12} - x) \cdot L_{12}}, \quad (2)$$

$$L_d = \frac{L_{12}}{2} - \frac{K_f}{Inf} \cdot \left(\frac{H_1^2 - H_2^2}{2 \cdot L_{12}} \right), \quad (3)$$

где H_1 и H_2 – уровни воды рек № 1 и 2 (рис. 2); H_x – уровень подземных вод на расстоянии x от уреза реки № 1; L_{12} – расстояние между урезами рек № 1 и 2; L_d – расстояние от уреза реки № 1 до водораздела между смежными реками № 1 и 2 (рис. 2).

При подготовке и анализе данных наблюдений использовались регрессионные зависимости (оценка параметров методом наименьших квадратов) при выполнении условий (4), (5) для уровня значимости 5 %:

$$\delta_r \approx \frac{1-r^2}{\sqrt{N-1}}, \quad (4)$$

$$R^2 > 0,36; \frac{|r|}{\delta_r} \geq 2; \frac{|k_r|}{\delta_k} \geq 2, \quad (5)$$

где N – объем выборки; R^2 – квадрат корреляционного отношения; r и δ_r – коэффициент корреляции и погрешность его определения; k_r и δ_k – коэффициент ре-

грессии и погрешность его определения [18]; расчёты выполнены в среде MS Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

В течение года обычно наблюдается определённое повышение уровней изученных подземных вод с мая по август–сентябрь (табл. 2, рис. 3), причем наиболее длительное и плавное увеличение уровней воды чаще отмечается на водораздельных пространствах (пример – скважины 445р и 18р), а более резкое – в речных долинах. Соответственно внутригодовым изменениям уровней речных (табл. 1) и подземных (табл. 2) вод в среднем за многолетний период отмечается уменьшение отношения K_I (2) инфильтрации к коэффициенту фильтрации в период половодья (рис. 4). Однако отрицательные значения, свидетельствующие о поступлении в водоносные горизонты речных вод, отмечены только в мае для скважин 124р (долина р. Оби), 81р (долина р. Чулым) и 94р (пойма р. Чай).

Еще одна важная особенность заключается в статистически значимых обратных связях между величиной K_I и средним слоем водного стока Y_{12} смежных рек (зависимость вида $K_I = b - a \cdot Y_{12}$, где Y_{12} – среднее арифметическое из слоёв стока смежных рек): условие (4), (5) выполняется для всех случаев со статистически значимыми коэффициентами корреляции (табл. 3).

В течение года меняется и положение границ подземных водосборов (рис. 5), особенно на границе между реками Обью и Васюган (скважина 124р), Обью и Шегаркой (63р), Чулым и Кией (81р), где коэффициент вариации Cv величины L_d составляет от 0,05 до 0,08 ($Cv = \frac{\sigma}{A}$, A и σ – среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонение).

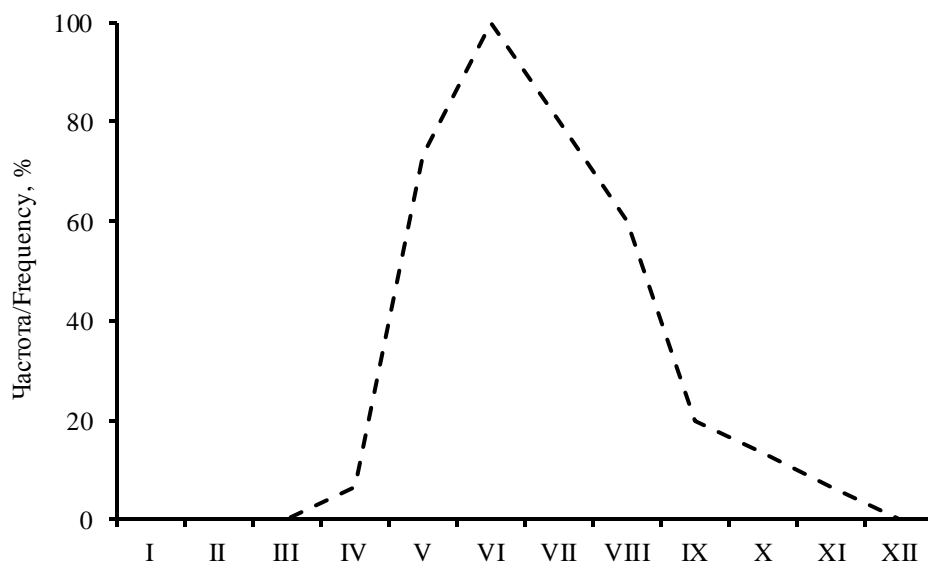


Рис. 3. Внутригодовое изменение средней частоты уровней подземных вод выше 2/3 годовой амплитуды (100 % m/N , m – количество случаев; $N=15$ – количество изученных вариантов)

Fig. 3. Intra-annual change in the average frequency of groundwater levels above 2/3 of the annual amplitude (100 % m/N , m is the number of cases; $N=15$ is the number of options explored)

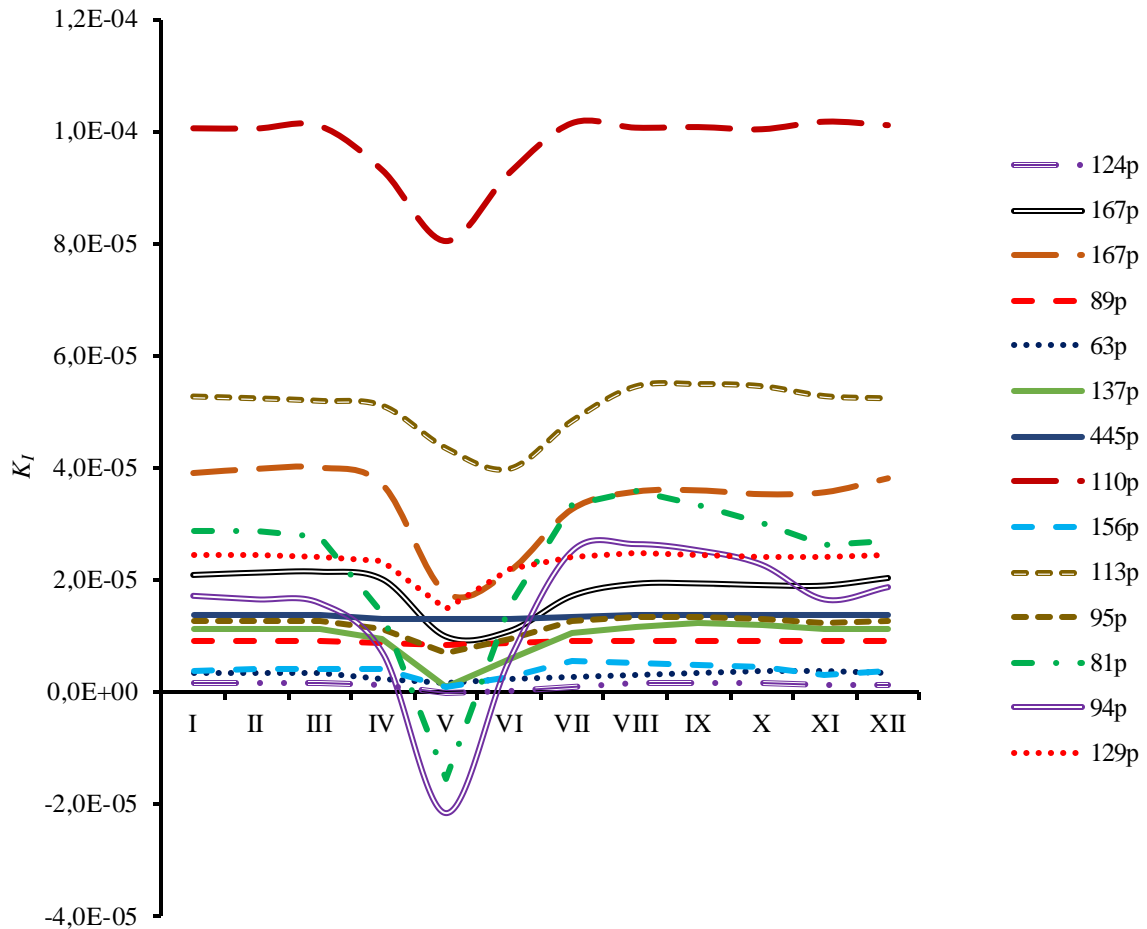


Рис. 4. Внутригодовое изменение отношения инфильтрации к коэффициенту фильтрации K_I (2) в среднем за многолетний период (номера гидрогеологических скважин приведен в табл. 2)

Fig. 4. Intra-annual change in the ratio of infiltration to the filtration coefficient K_I (2) on average over a long period (numbers of hydrogeological wells are given in Table 2)

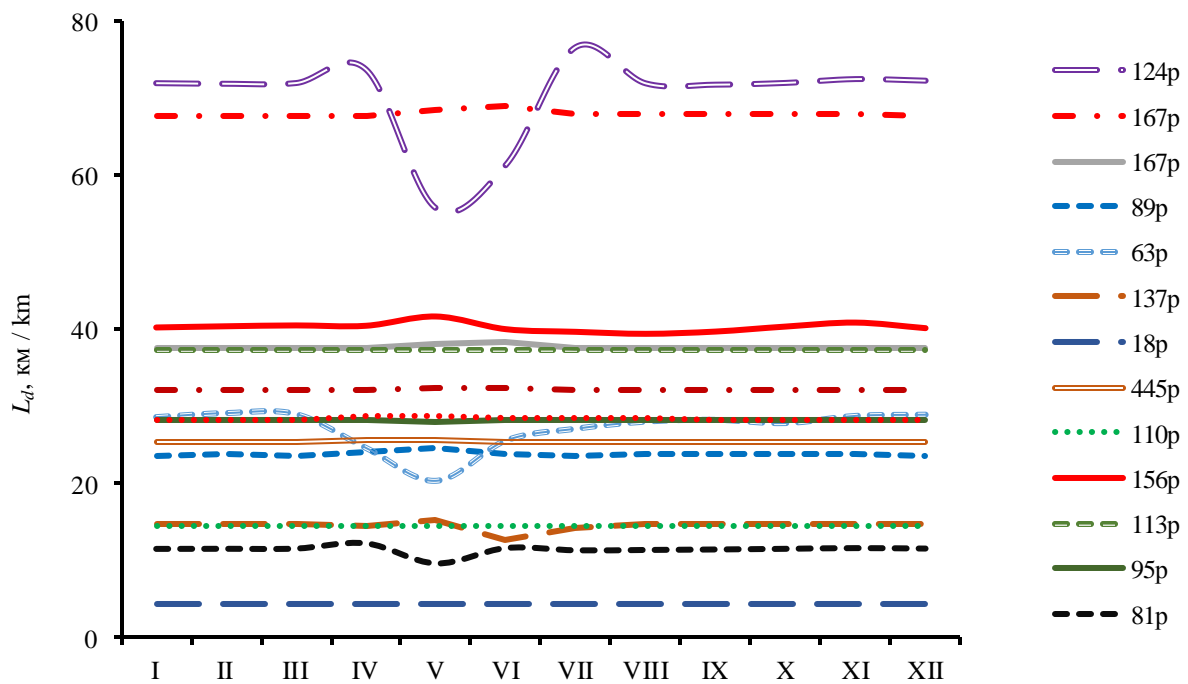


Рис. 5. Внутригодовое изменение расстояния L_d от реки № 1 до водораздела смежных рек № 1 и 2

Fig. 5. Intra-annual change in the distance L_d from river no. 1 to the watershed of adjacent rivers no. 1 and 2

Таблица 3. Среднедолгосрочные уровни изученных подземных и речных вод (обозначения к схеме на рис. 2)

Table 3. Average long-term levels of the studied groundwater and river waters (notations for the scheme in Fig. 2)

Скважина Well	Пункт Locality	$A(K_i)$	$\sigma(K_i)$	r_{1Y}	L_{12}	$A(L_d)$	$\sigma(L_d)$	Порядок расчета: реки 1, 2 (номер по табл. 1) Calculation order: rivers 1, 2 (no. according to Table 1)	$A(H_{gr})$	$A(H_1)$	$A(H_2)$	$A(H_{Ld})$	$\sigma(H_{Ld})$
		10^{-6}			км/км				м/м				
124p	Александровское Aleksandrovskoe	1,10	0,63	-0,89	135,0	70,3	5,8	4–22	38,22	35,92	54,87	82,57	19,55
167p	Средний Васюган	18,21	3,86	-0,91	135,0	68,0	0,3	4–22	60,82	35,92	54,87	288,71	34,10
167p	Sredny Vayugan	34,02	7,11	-0,91	74,6	37,6	0,3	3–22	60,82	42,13	54,87	220,79	24,88
89p	Каргала/Kargala	9,01	0,25	-	39,9	23,8	0,3	1–16	99,39	72,76	89,91	102,05	0,35
63p	Мельниково/Melnikovo	2,99	0,61	-	34,0	27,2	2,6	1–16	78,70	72,76	89,91	89,24	0,77
137p	Тегульдэт/Teguldet	9,89	3,26	-0,83	32,7	14,6	0,6	8–12	127,51	125,12	120,17	133,12	2,38
18p	Предтеченск Predtechensk	723,28	2,32	-	8,9	4,4	0,0	6–7	142,82	81,45	79,56	144,24	0,10
445p	Чернышёвка Chernyshevka	13,48	0,30	-0,59	51,3	25,5	0,1	1–5	100,68	72,76	70,97	118,36	0,33
110p	Бакчар/Bakchar	97,85	6,33	-0,54	28,6	14,4	0,0	19–18	102,34	93,17	96,34	170,14	3,45
156p	Напас/Napas	3,77	1,20	-0,39	76,3	40,3	0,6	15–14	64,43	63,92	75,43	100,85	7,27
113p	Белый Яр/Bely Yar	50,73	4,66	-0,83	75,0	37,3	0,0	10–13	76,49	75,43	65,75	276,06	11,91
95p	Подгорное/Podgomoe	11,92	1,92	-0,90	57,0	28,2	0,1	17–2	69,77	63,14	60,15	115,83	6,49
81p	Зырянское/Zyryanskoe	23,70	14,01	-0,84	22,0	11,4	0,6	9–11	99,77	98,18	101,23	112,98	6,88
94p	Подгорное/Podgomoe	14,58	13,20	-0,78	57,0	28,4	0,2	17–2	64,27	63,14	60,15	134,46	19,31
129p	Пудино/Pudino	23,25	2,72	-0,89	63,4	32,3	0,1	20–21	87,18	80,11	89,67	174,71	8,07

Примечание: $A(H_{gr})$ – среднее арифметическое значение (в целом за многолетний период для всего года) измеренных уровней подземных вод; $A(H_1)$ и $A(H_2)$ – средние арифметические значения (в целом за многолетний период для всего года) уровней воды смежных рек № 1 и 2; L_{12} – расстояние между урезами воды смежных рек; r_{1Y} – статистически значимые коэффициенты корреляции между отношением инфильтрации к коэффициенту фильтрации и средним слоем водного стока смежных рек; $A(K_i)$ и $\sigma(K_i)$ – средние арифметические значения и средние квадратические отклонения величины K_i ; $A(L_d)$ и $\sigma(L_d)$ – средние арифметические значения и средние квадратические отклонения положения водораздела между смежными реками относительно реки № 1; $A(H_{Ld})$ и $\sigma(H_{Ld})$ – средние арифметические значения и средние квадратические отклонения уровней подземных вод на водоразделе; полужирным шрифтом выделены значения $A(H_{Ld})$, превышающие отметки поверхности.

Note: $A(H_{gr})$ is the arithmetic mean value (in general for a long-term period for the whole year) of observed groundwater levels; $A(H_1)$ and $A(H_2)$ are the arithmetic mean values (in general for a long-term period for the whole year) of water levels of adjacent rivers no. 1 and 2; L_{12} is the distance between the water edges of adjacent rivers; r_{1Y} is the statistically significant correlation coefficients between the ratio of infiltration to average hydraulic conductivity and the average layer of the water runoff of adjacent rivers; $A(K_i)$ and $\sigma(K_i)$ are the arithmetic mean values and standard deviations of K_i ; $A(L_d)$ and $\sigma(L_d)$ are the arithmetic mean values and standard deviations of the watershed position between adjacent rivers relative to river no. 1; $A(H_{Ld})$ and $\sigma(H_{Ld})$ are the arithmetic mean values and standard deviations of groundwater levels in the watershed; bold font indicates $A(H_{Ld})$ values that exceed the surface elevations.

При этом положение расчетных уровней воды на водоразделе может превышать отметки поверхности (табл. 3), что, предположительно, объясняется наличием локальных водоупоров и/или анизотропией фильтрационных свойств грунтов и их наклонным залеганием, то есть отклонением от принятых допущений при использовании (1)–(3). С другой стороны, эти отклонения сами по себе являются косвенной характеристикой специфических гидрогеологических условий [16, 19]. Например, в случае междуречья рек Обь и Васюган можно предположить наличие подземного стока не только вдоль русла р. Васюган, но и от р. Васюган в сторону с. Александровское (скважина 124p), примерно вдоль притока р. Оби – р. Ильяк. Аналогичный вывод (о меридиональном направлении подземного стока) вытекает и при анализе отметок поверхности, уровней подземных и речных вод в правобережье р. Оби (рис. 6). Но для его уточнения и объяснения различий в междуречьях Чулыма и Кети, Кети и Пайдугины, Пайдугины и Тыма требуется более детальный анализ гидрогеологических условий с учё-

том наблюдаемых региональных изменений режима подземных и поверхностных вод [2, 9, 15, 20, 21] за рамками рассматриваемой работы.

Если говорить о выявленных изменениях величины L_d , то полученные результаты являются аргументом в пользу приведенного в [22] предложения рассматривать границы водосборов не в виде линии, а в виде полосы. Ширина последней может быть ориентировочно определена при уровне значимости 5% в диапазоне от $A(L_d) - 2 \cdot \sigma(L_d)$ до $A(L_d) + 2 \cdot \sigma(L_d)$, где $A(L_d)$, $\sigma(L_d)$ – среднее арифметическое значение и среднее квадратическое отклонение величины L_d , вычисленной по уравнению (3).

В целом указанные факты позволяют сделать вывод о взаимосвязанном функционировании и коэволюции подземных и поверхностных водных объектов. Наличие обширных болотных массивов озёр на водоразделах средних рек (например, озеро Мирное между реками Чузык и Чижалка) в какой-то мере предопределено пространственным положением речной сети, основная часть которой (верхнее и среднее те-

чение средних рек), в свою очередь, формируется при насыщении грунтов и в целом отражает гидрогеологические условия. В частности, неравномерность внутригодового речного стока во многих случаях возникает при затрудненном водообмене между реками и подземными водоносными горизонтами [22].

В свою очередь, неравномерность стока малых рек может приводить к дополнительному заболачиванию в меженный период вследствие сохраняющегося в течение года избыточного увлажнения при затрудненном стоке, которое стимулирует дальнейшее заболачивание водосборов.

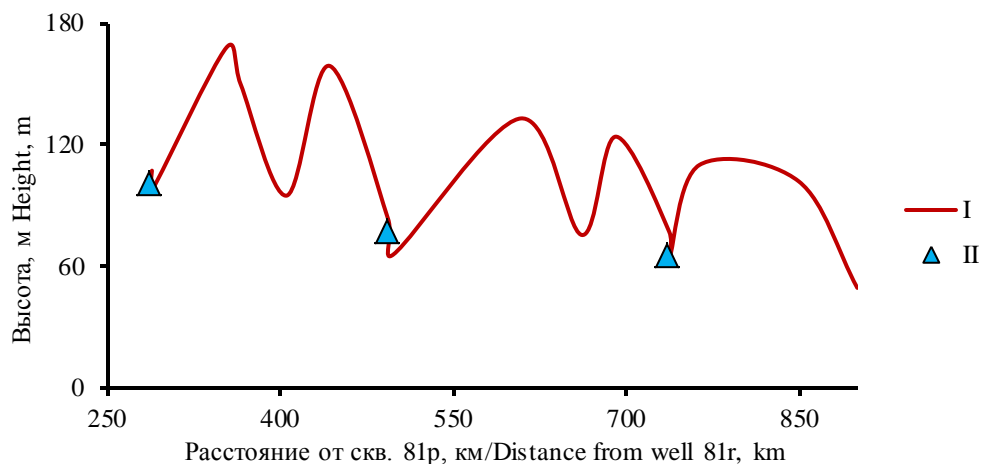


Рис. 6. Схематичный профиль поверхности (I, включая уровни речных вод) и среднее многолетние уровни подземных вод (II: 81р, 113р, 156р) на участке от с. Зырянское до уреза воды р. Вах у с. Ларьяк

Fig. 6. Schematic surface profile (I, including river water levels) and average long-term groundwater levels (II: 81р, 113р, 156р) in the area from the Zyryanskoe village to the water's edge of the Vakh river near the Laryak village

Заключение

В результате обобщения данных многолетних гидрологических и гидрогеологических наблюдений на территории Томской области выполнена оценка величины K_f (отношение инфильтрации к коэффициенту фильтрации) и положения водоразделов для 15 участков, ограниченных урезами рек, между которыми проводятся (проводились ранее) наблюдения на режимной гидрогеологической скважине. Показано, что инфильтрация в целом снижается во время половодья (при допущении менее значительных внутригодовых изменений средних по разрезу коэффициентов фильтрации), причем на водоразделах – дольше и более плавно, чем

в речных долинах. Внутригодовое изменение величины K_f в большинстве случаев обратно пропорционально изменению среднего значения слоя водного стока смежных рек. Выполнена количественная оценка внутригодовых изменений положения водоразделов рек, отличающегося от положения линии наивысших отметок рельефа. С учетом этого граница водосборов должна рассматриваться не как линия, а как полоса, что целесообразно учитывать при разработке гидрогеологических и гидрологических прогнозов, проведении инженерных изысканий для строительства.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 23-27-00039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Мысливец В.И. Преобразования глобального рельефа // Современные глобальные изменения природной среды. В 2-х т. Т. 1. – М.: Научный мир, 2006. – С. 615–626.
- Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации. Научно-прикладной справочник / под ред. В.Ю. Георгиевского. – СПб: ООО «РИАЛ», 2021. – 190 с.
- Future trajectory of Arctic system evolution / K. Saito, J. Walsh, A. Bring, R. Brown, A. Shiklomanov, D. Yang // Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems / ed. by D. Yang, D.L. Kane. – Switzerland: Springer Nature, 2021. – P. 893–914. DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9_30.
- Третьяков М.В., Шикломанов А.И. Оценка влияния на гидрологические процессы в Обской губе климатических и антропогенных изменений на ее водосборе // Водные ресурсы. – 2022. – Т. 49. – № 5. – С. 608–624. DOI: 10.31857/S0321059622050169.
- Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Л.И. Инишева, Т.В. Курнишкова, З.А. Слукса, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведчикова / под ред. В.Б. Куваева. – Тула: Гриф и К°, 2001. – 584 с.
- Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate / T. Minayeva, W. Bleuten, A. Sirin, E.D. Lapshina // Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – V. 190 – P. 315–341.
- Deng Zh., Zhang Ya. Discussion on hydrogeology and environmental geology work under the view of sustainable development // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2nd International Conference on Air Pollution and Environmental Engineering. – 2020. – V. 450. – 012121. – P. 1–5. DOI: 10.1088/1755-1315/450/1/012121.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2. Средняя Обь. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 408 с.
- Льготин В.А., Савичев О.Г., Макушин Ю.В. Многолетние изменения среднесезонных и среднегодовых уровней и температуры подземных вод в верхней гидродинамической зоны в Томской области // Геожология. – 2010. – № 1. – С. 23–29.
- Гидрогеология СССР. Т. 16. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области) / под ред. В.А. Нуднера. – М.: Недра, 1970. – 368 с.

11. Ресурсы пресных и маломинерализованных подземных вод южной части Западно-Сибирского артезианского бассейна / отв. ред. Е.В. Пиннекер. – М.: Наука, 1991. – 262 с.
12. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество ежегодное издание. 2020 год. – СПб: Росгидромет, 2021. – 153 с.
13. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2020 г. Информационный бюллетень, выпуск 17. – Томск: филиал «Сибирский региональный центр ГМЧН», 2021. – 194 с.
14. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2021 г. Информационный бюллетень, выпуск 18. – Томск: филиал «Сибирский региональный центр ГМЧН», 2022. – 204 с.
15. Savichev O., Moiseeva J., Guseva N. Changes in the groundwater levels and regimes in the taiga zone of Western Siberia as a result of global warming // Theoretical and Applied Climatology. – 2022. – V. 147 (3–4). – P. 1121–1131. DOI: 10.1007/s00704-021-03879-4.
16. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. – М.: КДУ, 2009. – 334 с.
17. Hendriks M.R. Introduction to Physical Hydrology. – Oxford, New York: Oxford University Press, 2010. – 331 p.
18. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
19. Weight W.D. Hydrogeology field manual. 2nd ed. – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. – 751 p.
20. Ковалевский В.С. Режим подземных вод и его изменения // Современные изменения глобальной природной среды. В 2-х т. Т. I. – М.: Научный мир, 2006. – С. 439–481.
21. River freshwater flux to the Arctic Ocean / A. Shiklomanov, S. Déry, M. Tretiakov, D. Yang, D. Magritsky, A. Georgiadi, W. Tan // Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems / ed. by D. Yang, D.L. Kane. – Switzerland: Springer Nature, 2021. – P. 703–735. DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9_24
22. Савичев О.Г. Гидроэкологическое обоснование водохозяйственных решений. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2021. – 167 с.

Поступила: 25.12.2022 г.

Дата рецензирования: 25.01.2023 г.

Информация об авторах

Савичев О.Г., доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Лобурь Я.Н., магистрант отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.314.6(282.256.1)

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF RELATIONS OF RIVER AND GROUND WATER IN THE MIDDLE OB BASIN (WESTERN SIBERIA)

Oleg G. Savichev¹,
OSavichev@mail.ru

Yana N. Lobur¹,
ynl5@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Knowledge of the mechanisms and patterns of changes in groundwater flow, the conditions for the interaction of groundwater, river and swamp waters of the Ob river basin, including the Tomsk region, is necessary to predict changes in the region's water resources and plan measures for their integrated use and protection.

The aim of the research is quantitative assessment of the interrelations of river and groundwater in the Middle Ob river (Tomsk region) based on the results of determining the ratio of infiltration to the filtration coefficient and the position of groundwater levels on river watersheds.

Methods: statistical methods, methods of mathematical modeling.

Results and conclusions. The data of long-term hydrological (22 posts on the Ob river and its tributaries) and hydrogeological (14 hydrogeological wells) observations on the territory of the Tomsk region for the period from the 1960s till 2005–2015 were analyzed. It is shown that infiltration generally decreases during floods, and on watersheds it decreases longer and more smoothly than in river valleys. The intra-annual change in the ratio of infiltration to hydraulic conditions in most cases is inversely proportional to the change in the average value of the water flow layer of adjacent rivers. A quantitative assessment of intra-annual changes in the position of river watersheds was made. The most significant changes were found on the border between the rivers: Ob and Vasyugan (well 124p), Ob and Shegarka (63p), Chulym and Kiya (81p). It is concluded that the catchment boundary should be considered not as a line, but as a strip. Quantitative confirmations of regional ground runoff were obtained not only along the rivers, but also in the meridional direction (approximately from south to north).

Key words:

ground and river waters, the Middle Ob river, infiltration ratio to hydraulic conditions, water level regime.

The research was carried out using the RSF grant (project no. 23-27-00039).

REFERENCES

- Myslivets V.I. Preobrazovaniya globalnogo relyefa [Transformations of the global relief]. *Sovremennye globalnye izmeneniya prirodnoy sredy* [Modern global changes natural environment]. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2006. Vol. 1, pp. 615–626.
- Mnogoletnie kolebaniya i izmenchivost vodnykh resursov i osnovnykh kharakteristik stoka rek Rossiyskoy Federatsii [Long-term fluctuations and variability of water resources and main characteristics of river runoff in the Russian Federation]. Scientific and applied reference book. Ed. by V.Y. Georgievsky. St. Petersburg, LLC «RIAL» Publ., 2021. 190 p.
- Saito K., Walsh J., Bring A., Brown R., Shiklomanov A., Yang D. Future Trajectory of Arctic System Evolution. In: *Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems*. Eds. D. Yang, D.L. Kane. Switzerland, Springer Nature, 2021. pp. 893–914. DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9_30.
- Tretyakov M.V., Shiklomanov A.I. Assessment of the impact on hydrological processes in the Gulf of Ob of climatic and anthropogenic changes in its catchment area. *Water Resources*, 2022, vol. 49, no. 5, p. 608–624. In Rus. DOI: 10.31857/S0321059622050169.
- Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bolotnye sistemy Zapadnoy Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* [Bog of Western Siberia and their conservation value]. Tula, Grif i K° Publ., 2001. 584 p.
- Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.D. Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate. *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. Vol. 190, pp. 315–341.
- Deng Zh., Zhang Ya. Discussion on hydrogeology and environmental geology work under the view of sustainable development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2nd International Conference on Air Pollution and Environmental Engineering, 2020, 450, 012121, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1755-1315/450/1/012121.
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 15. Altay i Zapadnaya Sibir. Vyp. 2. Srednyaya Ob* [Surface water resources of the USSR. Vol. 15. Altai and Western Siberia. Iss. 2. Middle Ob]. Ed. by O.N. Panin. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972. 408 p.
- Lgotin V.A., Savichev O.G., Makushin Yu.V. Long-term changes in the average seasonal and average annual levels and temperature of groundwater in the upper hydrodynamic zone in the Tomsk region. *Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2010, no. 1, pp. 23–29. In Rus.
- Gidrogeologiya SSSR* [Hydrogeology of the USSR]. T. 16. Zapadno-Sibirskaya ravnina (Nyuenskaya, Omskaya, Novosibirskaya i Tomskaya oblasti) [Vol. 16. The West Siberian Plain (Tyumen, Omsk, Novosibirsk and Tomsk regions)]. Ed. by V.A. Nudner. Moscow, Nedra Publ., 1970. 368 p.
- Resursy presnykh i malomineralizovannykh podzemnykh vod yuzhnoy chasti Zapadno-Sibirskogo artziyanskogo basseyna* [Resources of fresh and low-mineralized groundwater in the southern part of the West Siberian artesian basin]. Ed. by E.V. Pinneker. Moscow, Nauka Publ., 1991. 262 p.
- Vodny kadastr. Resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, ikh ispolzovanie i kachestvo. 2020 god* [Water cadastre. Surface and groundwater resources, their use and quality. 2020 year]. St. Petersburg, Roshydromet Publ., 2021. 153 p.
- Sostoyaniye geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Sibirskogo federalnogo okruga v 2020 g. Informatsionnyy byulleten* [Condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2020. Informational bulletin]. Vol. 17. Tomsk,

- Filial «Sibirskiy regionalny tsentr GMSN», FGBU «Gidropetsgeologiya» Publ., 2021. 194 p.
14. *Sostoyanie geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Sibirskogo federalnogo okruga v 2021 g. Informatsionny byulleten* [Condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2021. Informational bulletin]. Vol. 18. Tomsk, Filial «Sibirskiy regionalny tsentr GMSN», FGBU «Gidropetsgeologiya» Publ., 2022. 204 p.
 15. Savichev O., Moiseeva J., Guseva N. Changes in the ground water levels and regimes in the taiga zone of Western Siberia as a result of global warming. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, vol. 147 (3–4), pp. 1121–1131. DOI: 10.1007/s00704-021-03879-4.
 16. Shestakov V.M. *Gidrogeodinamika* [Hydrogeodynamics]. Moscow, KDU Publ., 2009. 334 p.
 17. Hendriks M.R. *Introduction to physical hydrology*. Oxford; New York, Oxford University Press, 2010. 331 p.
 18. SP 33-101-2003. *Svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics]. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. 72 p.
 19. Weight W.D. *Hydrogeology field manual*. 2nd ed. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
 20. Kovalevsky V.S. Rezhim podzemnykh vod i ego izmeneniya [Groundwater regime and its changes]. *Sovremennye globalnye izmeneniya prirodnoy sredy* [Modern global changes natural environment]. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2006. Vol. 1, pp. 439–481.
 21. Shiklomanov A., Déry S., Tretiakov M., Yang D., Magritsky D., Georgiadi A., Tan W. River freshwater flux to the Arctic Ocean. *Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems*. Eds. D. Yang, D.L. Kane. Switzerland, Springer Nature, 2021. pp. 703–735. DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9_24.
 22. Savichev O.G. *Gidroekologicheskoe obosnovanie vodokhozyaystvennykh resheniy* [Hydroecological substantiation of water management decisions]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2021. 167 p.

Received: 25 December 2022.

Reviewed: 25 January 2023.

Information about the authors

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yana N. Lobur, master student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 574.24:579.26

МИКРОБНЫЕ СООБЩЕСТВА КУЛЬДУРСКИХ ТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ИХ УЧАСТИЕ В НАКОПЛЕНИИ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ И МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИИ

Лебедева Елена Геннадьевна¹,
microbiol@mail.ru

Харитоновна Наталья Александровна²,
tchenat@mail.ru

Брагин Иван Валерьевич¹,
bragin_ivan@mail.ru

Кузьмина Татьяна Вениаминовна¹,
tkuzmina@mail.ru

¹ Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100 лет Владивостоку, 159.

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1.

Актуальность исследований продиктована тем, что несмотря на многолетние режимные наблюдения за температурой и химическим составом термальных вод, сведения о населяющих термальные воды и бактериальные маты микроорганизмах и их биогеохимической роли практически отсутствуют.

Цель: изучить состав, численность функциональных групп бактерий в воде и в микробных матах, формирующихся в различных температурных зонах, и исследовать их роль в накоплении микроэлементов и образовании минералов в термальных источниках Кульдур.

Объектами исследования являлись термальные подземные воды месторождения Кульдур следующих скважин № 1-87, 2-87, 3-87, 3-51, 5-51, а также микробные маты, формирующиеся в озерах и ручьях по изливу термальных источников Кульдур.

Методы: химические и микробиологические методы. Для анализа содержания в воде микроэлементов пробы анализировали с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой. Определение содержания хлорофилла а в микробных матах проводили спектрофотометрически в этанольных экстрактах. Численность различных физиологических групп бактерий определяли на различных селективных средах методом Коха и предельных разведений. Культуры чистили методом истающего штриха. Элементный анализ микробных матов проводили методом ICP-MS на спектрометре. Фазовый состав минералов определяли с помощью рентгено-фазового анализа на дифрактометре.

Результаты. Показано, что термальные воды исследуемых скважин являются щелочными, низкоминерализованными, в составе катионов преобладает натрий, среди анионов преобладает хлор, фтор и сульфат-ион. Среди микроэлементов доминирует литий, мышьяк и стронций. В изученных скважинах термальных вод отмечена низкая численность бактерий различных физиологических групп, при этом их количество было выше в более низкотемпературных водах. В микробных матах различных термальных зон отмечен разный состав физиологических групп бактерий, при этом преобладали микроорганизмы геохимического цикла серы, железа и марганца. Показано присутствие в составе всех отобранных матов цианобактерий, для которых характерно наличие хлорофилла а. Выявлено значительное накопление микробными сообществами многих редкоземельных элементов (особенно легких) – ванадия, а также урана и тория. В микробных матах отмечено преимущественное осаждение кремния в виде кварца и плагиоклаза.

Ключевые слова:

Термальные источники, Кульдур, микробный мат, физиологические группы, численность бактерий, накопление микроэлементов, осаждение минералов.

Введение

Наземные горячие источники являются экстремальными природными системами, которые характеризуются высокой температурой и поступлением восстановленных глубинных веществ. На выходе термальных вод формируются уникальные сообщества – цианобактериальные маты, которые считают аналогами древних фототрофных сообществ. Бактериальные маты – это высокоструктурированные слоистые сообщества с существенными физико-химическими градиентами. В состав микробных матов входят разнообразные консорциумы, состоящие в основном из прокариот (эубактерий и архей). Различные функциональные группы в микробных сообще-

ствах связаны тесными трофическими отношениями, позволяющими им эффективно участвовать в преобразовании органических и неорганических веществ. Микробные сообщества матов играют важную роль в геохимическом круговороте элементов и приводят в движение биогеохимические циклы, которые намного превосходят по скорости неорганические реакции [1]. Исследования последних лет показывают, что микробные сообщества, формирующиеся на выходе подземных вод, играют важную роль в процессах концентрирования различных микроэлементов и минералообразования [2]. Так, многими авторами показана возможность накопления кадмия, таллия, никеля, бериллия, бора и многих редкоземельных элементов

(РЗЭ) альгобактериальными матами, а также водными растениями (ряска), некоторыми макрофитами и микроскопическими грибами рода *Penicillium*, *Penidiella* sp. [3–7]. Также показана важная роль бактерий в осаждении сульфатных, карбонатных и силикатных минералов в бактериальных матах озер и термальных источников. Микроорганизмы участвуют в процессах осаждения минералов либо непосредственно, либо косвенным путем, предоставляя твердые поверхности для гетерогенной нуклеации [8–10].

На Дальнем Востоке в Амурской области расположено месторождение термальных вод Кульдур. За прошедшее столетие на Кульдурском месторождении было пробурено несколько десятков скважин, изучено геологическое строение района, определен общий химический, микроэлементный, газовый состав вод, состав органических соединений, показано присутствие бактерий различных функциональных групп в термальных водах [11–13]. Однако отсутствуют данные о роли микробных сообществ в процессах концентрирования различных микроэлементов и образования минералов в микробных матах, формирующихся на выходе термальных вод. В связи с этим целью данной работы является изучить состав, численность функциональных групп бактерий в воде и в микробных матах, формирующихся в различных температурных зонах, и исследовать их роль в накоплении микроэлементов и образовании минералов в термальных источниках Кульдур.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись термальные воды Кульдурского месторождения (скважины № 1-87, 2-87, 3-87, 3-51, 5-51), а также микробные маты, формирующиеся в озерах и ручьях по изливу термальных вод (рис. 1). На термальной площадке образовано искусственное трехсекционное озеро. В первой секции озера при температуре 65° С формировался тонкий (не более 1 см толщиной) микробный мат зелено-желто-коричневого цвета (Kuld-1). В ручье, образованном из стекающих термальных вод озера второй секции, при температуре 54° С развивались микробные маты преимущественно темно-зеленого цвета толщиной до 2 см (Kuld-2). В ручье, формирующемся из вод скважины 3-87, при температуре 45° С были выявлены микробные маты коричнево-зеленого цвета с белыми прожилками толщиной до 3 см (Kuld-3).

При отборе проб термальных вод со скважин нестабильные параметры, такие как температура и pH, измерялись непосредственно на месте. Образцы термальных вод подвергали фильтрованию через целлюлозные фильтры (0,45 мкм), которые затем собирались в пластиковые пробирки. Для определения микрокомпонентов в пробы воды дополнительно вводили азотную кислоту. Определение микрокомпонентов в термальных водах выполнено в ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 7500c (Agilent Technologies, Inc., USA).

Пробы воды и бактериальных матов для микробиологического анализа отбирали в стерильные емкости в августе 2018 г.

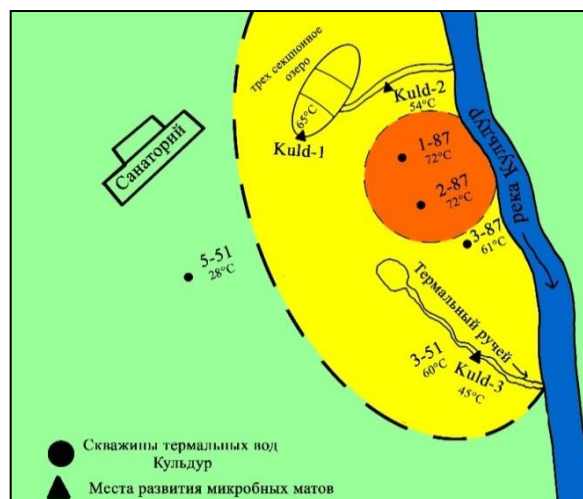


Рис. 1. Карта-схема расположения скважин термальных вод месторождения Кульдур и мест отбора проб микробных матов

Fig. 1. Schematic map of the location of wells of thermal waters of the Kuldur deposit and sampling sites for microbial mats

Пробы микробных матов для изучения накопления микроэлементов, морфологии и качественного состава минеральных фаз отбирали с сохранением структуры. Для определения пигментного состава пробы микробных матов отбирали стерильным пробочным сверлом площадью 1 см² и фиксировали 96 % раствором этилового спирта. В условиях лаборатории образцы микробных матов подвергали разрушению на ультразвуковом дезинтеграторе УЗДН Soniprep 150 plus при 14,5 кГц. Затем полученный состав осаждали центрифугированием при 7000 g в течение 5 мин, надосадочную жидкость использовали для спектрофотометрии. Спектры поглощения пигментов снимали на спектрофотометре Shimadzu UV-2550 (Япония). Определение содержания хлорофилла *a* в микробных матах гидротерм проводили спектрофотометрически в этанольных экстрактах. Для расчетов содержания хлорофилла *a* использовали формулу:

$$\text{мг (хл } a) = 11,9 \times OD_{665} \times (v/l),$$

где OD_{665} – оптическая плотность при длине волны 665 нм; v – объем экстракта в мл; l – длина кюветы. Бактериохлорофилл *c* в образцах бактериальных матов определяли по наличию длинноволнового максимума на спектрах *in vivo* при 740 нм. Химический анализ образцов термальных вод и микробных матов выполнен в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток).

Количество микроорганизмов разных экологотрофических групп определяли методом предельных разведений, для чего использовали различные селективные среды [14]. Микроорганизмы выращивали в термостате при температуре 25, 60 °С (подземные воды), 40, 50, 60 °С (микробные маты). Для изучения накопления элементов пробы матов промывали в термальной воде от грунтов, высушивали и тщательно растирали в мелкодисперсный порошок для химического анализа. После

этого биоматы подвергали микроволновому разложению в системах закрытого типа. Элементный анализ методом ICP-MS выполнен на спектрофотометре Agilent 7700x (Agilent Technologies, Japan). Для выявления и оценки биогеохимических особенностей накопления элементов микробным сообществом использовался коэффициент биологического накопления (Кб), который рассчитывался по формуле:

$$K_b = C1/C2,$$

где Кб – коэффициент биологического накопления; С1 – концентрация элемента в микробном мате; С2 – концентрация элемента в воде.

Для определения накопления элементов микробными сообществами использовался следующий подход: считалось, что элементы не концентрируются, если $\lg K_b < 1$, относительно слабо накапливаются при $\lg K_b = 1-3$, в небольшой степени накапливаются при $\lg K_b = 3-5$, в значительной степени концентрируются, если $\lg K_b = 5-6$ и элементы сильно концентрируются при $\lg K_b > 6$.

Для изучения образования минералов микроорганизмами пробы матов сушили в лабораторных условиях и тщательно перетирали в агатовых ступках. Навеску образца (1 г) помещали в кювету и снимали дифрактограммы. Интенсивность отражений оценивали из дифрактограмм по высоте пиков. Фазовый состав минералов определяли с помощью рентгенофазового анализа на дифрактометре D-8 Advance, Bruker.

Результаты и обсуждение

Химический состав термальных вод Кульдур

Результаты исследования показали, что воды Кульдурского термального поля являются щелочными, низкоминерализованными (табл. 1).

Таблица 1. Физико-химические параметры термальных вод Кульдур

Table 1. Physical and chemical parameters of Kuldur thermal waters

Показатели Parameters	Скважины подземных вод Groundwater wells				
	1-87	2-87	3-87	3-51	5-51
Температура Temperature, °C	72,0	72,0	61,0	60,0	28,0
pH	9,11	9,13	9,07	9,24	9,53
*Минерализация, мг/л Mineralization, mg/l	524,71	520,25	498,99	492,50	509,88

*Данные литературы/Literature data [12].

Преобладающими катионами являются натрий (87,7–94,3 мг/л), калий и кальций (1,71–2,24 мг/л). Концентрация магния низка и близка к нулю (0–0,03 мг/л). Среди анионов преобладают хлор-ион (31,5–34,9 мг/л), фтор-ион (17,7–18,9 мг/л) и сульфат-ион (16,1–18,5 мг/л). Среди микроэлементного состава значительно превалирует литий (351,8–369,7 мкг/л), мышьяк (79,2–113,1 мкг/л), стронций (65,3–83,3 мкг/л) и алюминий (24,22–53,92 мкг/л). Содержание железа в термальных водах было распределено неравномерно (3,56–356,8 мкг/л), его наибольшие количества отмечали в скважине № 3-87. Марганец и барий присут-

ствуют в термальных водах в низких количествах (0,28–11,46 мкг/л). Содержание общего углерода органического имеет невысокие значения и колеблется в пределах 0,3–3,7 мг/л, причем минимальные его значения наблюдаются в воде из центральных скважин (1-87, 2-87), а максимальные – в воде из скважины 3-51 [12].

Структура, численность функциональных групп бактерий в термальных водах и микробных матах месторождения Кульдур. Состав пигментов в микробных матах

В обследованных термальных подземных водах различных скважин выявлено низкое количество бактерий различных функциональных групп и их неравномерное распределение. Среднее число бактерий составляло от $0,2 \times 10^2$ (скв. 1-87) – $1,9 \times 10^2$ кл/мл (скв. 3-87). Более низкая численность функциональных групп микроорганизмов обнаружена в более горячих подземных водах центральных скважин (№ 1-87, 2-87), что коррелировало с низкими концентрациями общего органического углерода, выявленными в водах этих скважин [12]. В термальных водах скважин № 3-87, 3-51 и 5-51, отличающихся более низкими температурами вод (28–61 °C), обнаружена более высокая численность и состав эколого-трофических групп микроорганизмов. В подземных водах изученных скважин преобладали бактерии геохимического цикла серы (особенно тионовые $0,9 \times 10^2$ (3-51) – $2,5 \times 10^3$ кл/мл (3-87)), что согласуется с ранее полученными данными [13] и указывает на происходящие в термальных водах процессы окисления восстановленных соединений серы с участием микроорганизмов.

В микробных сообществах, формирующихся в различных температурных зонах (табл. 2), выявлены существенные различия в распределении, численности и составе доминирующих физиологических групп бактерий. В микробном мате Kuld-1, развивающемся при температуре 65 °C, отмечено наименьшее количество функциональных групп бактерий и их низкая средняя численность (табл. 2), что, вероятно, определялось высокой температурой вод, которая могла ингибировать рост бактерий. В составе микробных сообществ преобладали сульфатредуцирующие, марганец- и железовосстанавливающие, гетеротрофные железокисляющие микроорганизмы, что свидетельствует о протекающих в микробных матах процессах восстановления сульфатов до сульфидов, а также окисления и восстановления соединений железа и марганца. С уменьшением температуры термальных вод до 45 °C количество развивающихся функциональных групп бактерий и их средняя численность увеличивается, достигая максимума в мате Kuld-3, при этом наблюдается смена доминирующих микроорганизмов (табл. 2). В микробном мате Kuld-2, формирующемся при температуре 54 °C, отмечалось обильное развитие многих физиологических групп бактерий, при этом в составе микробного сообщества значительно преобладали сульфатредуцирующие, тионовые и силикатные бактерии (табл. 2). В микробном мате Kuld-3 при температуре воды 45 °C отмечено наибольшее количество функциональных групп

микроорганизмов и их наиболее высокая средняя численность (табл. 2). Доминирующими физиологическими группами были сапрофитные и гидролитические бактерии (табл. 2), которые являются первичными деструкторами органического вещества и принимают активное участие в разложении белков, жиров, сахаров, целлюлозы и крахмала. Также широко были представлены сульфатредуцирующие и бесцветные

серобактерии, которые обладали способностью восстанавливать сульфат до сероводорода и затем окислять его, откладывая серу внутри клеток. Появлению в составе микробного мата бесцветных серобактерий, вероятно, способствовало развитие мата в условиях проточной воды и более низких температур (45 °С), что необходимо для создания градиента сероводорода и кислорода.

Таблица 2. Физико-химические и микробиологические показатели развивающихся микробных матов в термальных источниках Кульдур

Table 2. Physicochemical and microbiological parameters of developing microbial mats in the Kuldur thermal springs

Точки отбора проб Sampling points	Описание микробных матов Description of microbial mats	T °С	pH	M*	Преобладающие физиологические группы, кл/см ³ Prevailing physiological groups, cells/cm ³	Хлорофилл <i>a</i> , мкг/см ² Chlorophyll <i>a</i> , µg/cm ²
Kuld-1 1-я секция термального озера first section of the thermal lake	Тонкая зелено-желто-коричневого цвета биопленка толщиной до 1 см Thin green-yellow-brown biofilm up to 1 cm thick	65	9,15	514,2	Железо и марганец восстанавливающие (3,6–4,0×10 ²), железокисляющие iron-oxidizing (3,3×10 ²), сапрофитные/saprophytic (2,8×10 ³)	8,1
Kuld-2 Выход терм из второй секции, ручей Therm exit from the second section, stream	Мат темно-зеленого цвета толщиной до 2 см Dark green mat up to 2 cm thick	54	9,11	518,4	Сульфатредуцирующие Sulfate reducing (6,8×10 ⁴), тионовые/thionic (1,2×10 ⁴), силикатные/silicate (7,4×10 ³), сапрофитные/saprophytic (5,4×10 ³)	11,2
Kuld-3 Ручей из водскв. 3-87 Stream from the waters of the well. 3-87	Мат коричнево-зеленого цвета с белыми обрастаниями толщиной до 3 см Brown-green mat with white fouling up to 3 cm thick	45	8,89	501,5	Сапрофитные/saprophytic (1,5×10 ³), гидролитические/hydrolytic (6,4×10 ³ –5,9×10 ⁴), сульфатредуцирующие/sulfate-reducing (1,2×10 ⁴), бесцветные серобактерии/colorless sulfur bacteria (8,9×10 ²)	12,4

*M – минерализация, мг/л/mineralization, mg/l.

Таким образом, результаты показывают, что температура термальных вод в местах формирования микробных матов оказывает значительное влияние на распределение, численность и состав доминирующих физиологических групп бактерий.

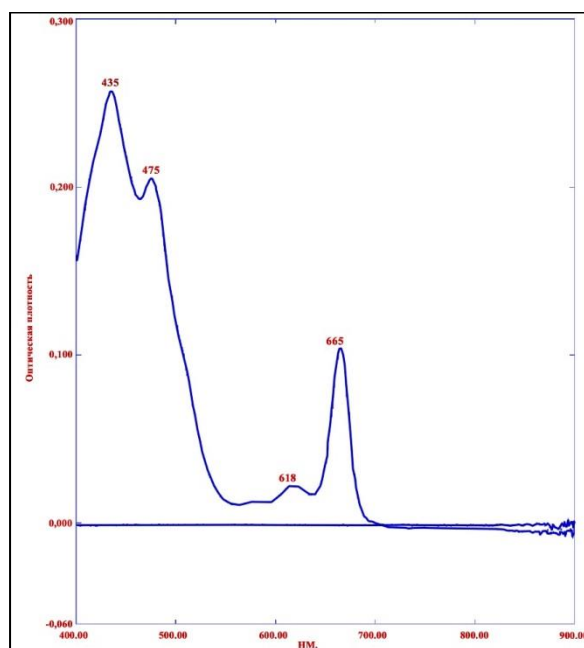


Рис. 2. Спектры поглощения образца микробного мата (точка Kuld-3, 45 °С)

Fig. 2. Absorption spectra of a microbial mat sample (Kuld-3 point, 45 °С)

Исследование содержания пигментов в микробных матах источников Кульдур показало, что во всех исследуемых образцах микробных матов в спектрах присутствуют четыре ярко выраженных пика поглощения: 435, 475, 618 и 665 нм (рис. 2). Пики 435, 475 нм указывают на содержание каротиноидов спирилло-ксантиновой серии в микробных матах. Каротиноиды – широкая группа пигментов, синтезируемая фототрофными микроорганизмами. Наличие пика 665 нм указывает на присутствие в составе матов цианобактерий, для которых характерно наличие хлорофилла *a* с максимумом при 665 нм. Измерение содержания хлорофилла *a* в этанольных экстрактах показывает, что с понижением температуры содержание пигмента в матах постепенно возрастает. В точке Kuld-1 (65 °С) содержание хлорофилла *a* составляет 8,1 мкг/см², тогда как в точках Kuld-2 (54 °С), Kuld-3 (45 °С) достигает 11,2 и 12,4 мг/м² соответственно (табл. 2). Наличие пика 618 нм, видимо, обусловлено наличием фикоцианина, характерного для большинства цианобактерий. Бактериохлорофилл *a* и *c* (750–758, 800-856 нм) в исследуемых образцах обнаружен не был, что указывает на отсутствие в матах зеленых серобактерий и пурпурных бактерий.

Накопление микроэлементов и образование минералов в микробных сообществах месторождения термальных вод Кульдур

Микроэлементный анализ термальных вод и микробных матов показал присутствие щелочных, щелочноземельных металлов, переходных металлов, метал-

лоидов и неметаллов, редкоземельных и радиоактивных элементов (табл. 3). Наибольшую концентрацию в воде имели Li (351,8–369,7 мкг/л) и As (109,8–113,1 мкг/л), также отмечено довольно высокое содержание Sr (до 68,8 мкг/л), Cs (до 31,58 мкг/л), Rb (до 31,10 мкг/л), Ga (до 12,4 мкг/л), Zn (до 11,3 мкг/л). В микробных матах выявлено высокое содержание таких элементов, как: Sr, Cs, V, Li и Ce, концентрация которых превышала их количество в воде в 118 (Li) – 4×10^6 раз (Ce) (табл. 3). Значения lg КБН в исследованных микробных сообществах варьировали от 1,64 (Kuld-2, Li) до 6,99 (Kuld-3, Pr), при этом элементов, не накапливающихся в матах, отмечено не было (табл. 4). Во всех изученных микробных матах относительно слабо концентрировались щелочные металлы Li, Rb, Cs, а также As и Ga, при этом средние значения lg КБН составляли 1,84 (Li) – 2,99 (Cs) (рис. 3).

Таблица 3. Микроэлементный состав минеральных вод и микробных матов месторождения Кульдур

Table 3. Trace element composition of mineral waters and microbial mats from the Kuldur deposit

Элементы Elements	Kuld-1 (65 °C)		Kuld-2 (54 °C)		Kuld-3 (45 °C)	
	Вода, мкг/л Water, µg/l	Мат № 1, мкг/кг Mat no. 1, mcg/kg	Вода, мкг/л Water, µg/l	Мат № 2, мкг/кг Mat no. 2, mcg/kg	Вода, мкг/л Water, µg/l	Мат № 3, мкг/кг Mat no. 3, mcg/kg
Li	369,7	24924,10	351,8	15487,37	355,0	42108,77
Be	0,123	2305,43	0,117	1265,43	0,0772	931,04
Sc	0,104	2195,94	0,124	1071,98	0,1161	2570,88
V	0,042	28758,58	0,041	17879,04	0,024	48587,05
Cr	0,064	2305,43	0,046	1265,43	0,061	931,04
Co	0,0052	4280,17	0,0067	1371,57	0,016	5151,91
Ni	0,852	8133,17	0,617	4379,45	0,274	9154,01
Cu	1,54	11274,22	0,63	15597,56	1,552	9167,52
Zn	11,3	105425	5,82	57175,0	3,53	73050,0
Ga	12,06	9048,61	12,4	5485,24	11,71	14742,21
As	110,2	19531,37	113,1	25395,07	109,8	10711,34
Rb	30,14	19631,96	30,315	13790,29	31,1	32323,67
Sr	68,8	125225,0	68,6	188350	68,5	159675,0
Y	0,0018	6184,23	0,0015	2223,80	0,017	6568,22
Ag	0,0476	49,28	0,0923	222,93	0,0561	49,75
Cd	0,0338	274,64	0,0027	168,92	0,0252	153,61
Cs	31,05	27518,87	31,34	20434,35	31,58	51042,60
Ba	0,67	61300,0	0,82	46525,0	0,58	71100,0
La	0,003	16731,17	0,0026	6881,32	0,0028	15623,84
Ce	0,0081	33692,56	0,056	14000,40	0,0074	28164,39
Pr	0,0007	4017,78	0,0004	1600,30	0,0004	3913,09
Nd	0,0031	14857,00	0,0019	4811,27	0,0018	14823,72
Sm	0,0005	2150,04	0,0006	799,35	0,0006	2254,09
Eu	0,0003	293,43	0,0002	118,96	0,0002	331,01
Gd	0,0007	1606,06	0,0007	620,12	0,0006	1846,80
Tb	0,0001	247,01	0,0001	87,89	0,0001	259,57
Dy	0,0004	1140,29	0,0005	413,87	0,0005	1211,67
Ho	0,0001	209,58	0,0001	76,55	0,0001	218,77
Er	0,0002	571,59	0,0004	208,19	0,0002	585,68
Tm	0,0001	70,79	0,0001	27,37	0,0001	72,46
Yb	0,0003	433,64	0,0003	161,61	0,0004	424,62
Lu	0,0001	61,48	0,0001	23,48	0,0001	60,72
Ti	0,021	226,26	0,0023	119,01	0,0028	174,58
Pb	0,118	14744,41	0,076	10654,24	0,096	13896,45
Th	0,001	5516,70	0,0007	1778,13	0,0009	5598,11
U	0,0016	484,45	0,0012	209,60	0,0011	485,27

По-видимому, одним из факторов, снижающих их накопление микробными матами, является сравни-

тельно высокое содержание этих элементов в воде (табл. 3). Низкая биоаккумуляция лития клетками микроводорослей и бактериальными матами минеральных вод показана ранее нами и другими авторами [15, 16]. В небольшой степени в микробных матах накапливались тяжелые металлы Cu, Cd, Zn, Ni (4,00–4,16), а также Ag, Ti, Cr (3,78–4,51), щелочноземельные Sr, Be, Ba (3,35–4,93) и редкоземельные элементы (РЗЭ) Sc (4,20) (рис. 3). При этом среднее содержание элементов в микробных матах превышало их концентрацию в воде в 1600 (Ag) – 86000 (Ba) раз (табл. 3). В значительной степени концентрировался в микробных матах Co и РЗЭ (Lu, Tm, Eu, Yb), а также V и радиоактивный U, при этом средние значения lg КБН изменялись от 5,39 (Co) до 5,99 (Eu) (рис. 3).

Таблица 4. Распределение значений lg КБН микроэлементов в микробных матах Кульдурских термальных источников

Table 4. Distribution of log values of biological accumulation coefficient (CBA) of microelements in microbial mats of Kuldur thermal springs

Элементы Elements	Kuld-1	Kuld-2	Kuld-3	Элементы Elements	Kuld-1	Kuld-2	Kuld-3
	65	54	45		65	54	45
°C							
Li	1,82	1,64	2,07	La	6,74	6,42	6,74
Be	4,28	4,02	4,06	Ce	6,61	5,39	6,58
Sc	4,34	3,95	4,33	Pr	6,75	6,60	6,99
V	5,85	5,65	6,38	Nd	6,68	6,40	6,91
Cr	4,58	4,40	4,19	Sm	6,63	6,12	6,57482
Co	5,63	5,13	5,41	Eu	5,99	5,77	6,21
Ni	3,98	3,84	4,53	Gd	6,36	5,94	6,48
Cu	3,86	4,39	3,77	Tb	6,39	5,94	6,41
Zn	3,96	3,99	4,31	Dy	6,45	5,91	6,38
Ga	2,87	2,64	3,10	Ho	6,32	5,88	6,33
As	2,24	2,35	1,98	Er	6,45	5,71	6,46
Rb	2,81	2,65	3,01	Tm	5,84	5,43	5,86
Sr	3,26	3,43	3,36	Yb	6,16	5,73	6,02
Y	6,53	6,17	5,59	Lu	5,78	5,37	5,78
Ag	3,01	5,38	2,94	Ti	4,03	4,71	4,79
Cd	3,90	4,79	3,78	Pb	5,09	5,14	4,15
Cs	2,94	2,81	3,20	Th	6,74	6,40	6,79
Ba	4,961	4,75	5,08	U	5,48	5,24	5,64

О значительном накоплении кобальта бактериальными матами термальных источников Хойто-Гол (Восточные Саяны), а также клетками цианобактерий рода *Oscillatoria sp.* указывают другие авторы [2, 17]. В работах японских коллег указывается на преимущественное накопление в чистых бактериальных культурах, биопленках и микробных матах горячих источников Накафуса (Япония) тяжелых РЗЭ, таких как Tm, Yb, Lu [18, 19]. В исследовании [20] сообщается о более значительной сорбции Eu (*Microbacterium sp.*), Tb (*Bacillus sp.*) и Yb (*Bacillus sp.*) чистыми культурами грамположительных бактерий при pH=4. О высоком накоплении V микробными сообществами сообщается другими авторами [1, 21]. Такое высокое концентрирование V в микробных матах, вероятно, связано с тем, что элемент хорошо концентрируется многими живыми организмами и его высокие количества находят в захороненных и ча-

стично метаморфизированных остатках органического вещества. Высокое накопление радиоактивного урана в микробных матах (5,24–5,64) нашло подтверждение в работах других исследователей. Так, в [22, 23] сообщается о существенной сорбции (>20 %)

радиоактивного урана одноклеточными зелеными водорослями *Scenedesmus quadricauda* и клетками грамотрицательных аэробных бактерий рода *Pseudomonas sp.* Показано, что в сорбции урана клетками бактерий участвуют органические фосфаты.

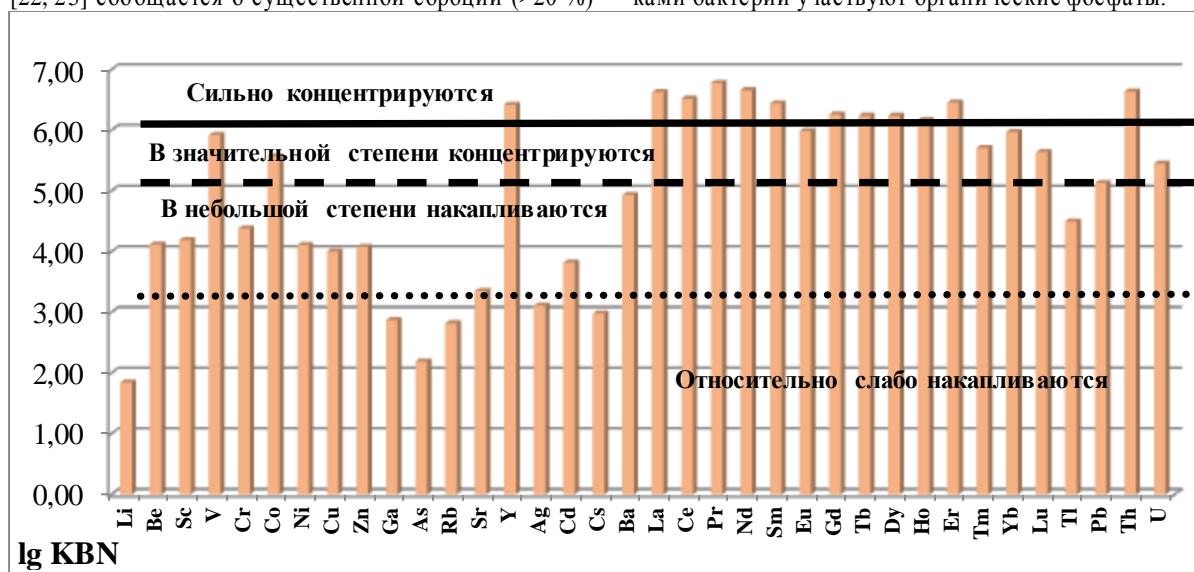


Рис. 3. Распределение средних значений КБН микроэлементов в микробных матах термальных источников Кульдур
 Fig. 3. Distribution of average CBA values of microelements in microbial mats of Kuldur thermal springs

Способность к высокой биосорбции урана также показана для бактерий рода *Rhizopus sp.*, *Sphingomonas sp.*, *Stenotrophomonas sp.* [24]. В наибольшем количестве накапливались в микробных матах термальных вод Кульдур многие РЗЭ и радиоактивный Th (рис. 3). Наиболее сильно концентрировались в матах легкие РЗЭ, особенно Ce (5,39–6,61), La (6,42–6,74), Nd (6,40–6,91), Pr (6,60–6,99), а также Th (6,40–6,79), при этом их содержание в матах достигало 4297,64 (Th) – 25285,78 (Ce) мкг/кг, тогда как в воде концентрация этих элементов была ниже в 4–5 млн раз (табл. 3). В литературе отмечается способность некоторых водных растений (ряска), микроскопических грибов рода *Penicillium sp.* и микробных матов минеральных источников Приморья к накоплению легких РЗЭ (Ce, La, Nd, Pr и др.) [3, 15, 16]. Возможной причиной преимущественной концентрации легких РЗЭ в микробных матах является образование комплексных соединений РЗЭ с гидроксильными группами и фосфат-содержащими соединениями микробных клеток, такими как: фосфаты, полифосфаты, фосфолипиды, нуклеиновые кислоты и фосфорилированные полисахариды. Количество данных, характеризующих накопление организмами радиоактивного тория, в литературе ограничено. Работы свидетельствуют о значительной биосорбции Th бактериями вида *Micrococcus luteus*, а также актиномицетами *Streptomyces sporoverrucosus* [24, 25].

Для микробных матов, отобранных из низкотемпературных зон (Kuld-3, 45 °C) более высокие значения lg КБН были характерны для большинства изученных элементов. Значения КБН таких элементов, как As (2,35), Ag (3,38), Sr (3,43) и Cu (4,39), были выше в микробных матах, выделенных из средней температурной зоны (Kuld-2, 54 °C). В термофильных

микробных сообществах высокотемпературных зон (Kuld-1, 65 °C) особенно эффективно концентрировались некоторые тяжелые металлы (Cd, Co), элементы (Be, Cr) и РЗЭ (Lu, Yb, Dy, Ce, Sm, La) (табл. 4).

В микробных сообществах термальных источников Кульдур также происходили процессы биогенного минералообразования. По результатам рентгенофазового анализа показано, что в матах происходило преимущественное осаждение кремния в виде кварца и плагиоклаза (табл. 5).

Таблица 5. Состав минералов в микробных матах термальных источников Кульдур

Table 5. Composition of minerals in microbial mats from Kuldur thermal springs

Минералы Minerals	Kuld-1 (65 °C)	Kuld-2 (54 °C)	Kuld-3 (45 °C)
Хлорит/Chloite (Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ *(Mg,Fe) ₃ (OH) ₆	+	+	+
Слюда/Mica Na ₂ (Al,Mg,Fe,Li) ₃ [AlSi ₃ O ₁₀](OH,F) ₂	+	++	++
Кварц/Quartz SiO ₂	+++	+++	+++
Плагиоклаз/Plagioclase NaAlSi ₃ O ₈	+++	++	++
Кальцит/Calcite CaCO ₃	-	-	+
Элементарная сера/Elemental sulfur S ₈	-	-	+

«-» – отсутствие; «+» – небольшие количества минерала; «++» – средние; «+++» – высокие (оператор Н.В. Грудя).
 «-» – absence; «+» – small amounts of the mineral; «++» – medium; «+++» – high (specialist N.V. Gruda).

Наиболее высокие концентрации кварца и плагиоклаза выявлены в микробном мате Kuld-1, отобранном из высокотемпературной зоны (65 °C). Отложение минералов кремния часто наблюдаются в микробных матах различных горячих источников и часто

связаны с деятельностью микроорганизмов [26, 27]. Также в микробных матах отлагались минералы хлорит и слюда (табл. 5). Из литературных данных известно, что микроорганизмы могут участвовать в образовании и трансформации таких глинистых минералов, как хлорит, и в их присутствии ход процессов значительно ускоряется [28]. В микробных матах, формирующихся в низкотемпературных зонах (Kuld-3, 45 °С) отмечено образование небольших количеств минералов кальцита и элементарной серы (табл. 5). Известно, что кальцит формируется внутри микробных сообществ в тех источниках, где содержание кальция в термальных водах достаточно высоко [29]. Так как термальные воды Кульдур содержат кальция не более 2 мг/л, формирование существенных количеств кальцита не происходит. Необходимыми предпосылками для образования кальцита является активная деятельность цианобактерий, которые в процессе своей жизнедеятельности могут повышать pH среды и поступление необходимого количества катиона Ca^{2+} [9]. Формированию кальцита в микробных матах может также способствовать деятельность гетеротрофных бактерий, способных создавать щелочную микросреду в результате их физиологической активности. Организмы, способные это делать, включают сапрофитные, сульфатредуцирующие (выделяют бикарбонат), нитритоксилирующие (восстанавливают нитраты) и аммонифицирующие бактерии (разлагающие мочевину, выделяют ионы аммония) [28, 30]. В микробном мате Kuld-3 отмечены наибольшие количества сапрофитных ($1,5 \times 10^5$ кл/см³) и аммонифицирующих бактерий ($8,4 \times 10^2$ кл/см³), что, вероятно, могло повлиять на образование кальцита только в этом образце. Образование элементарной серы в микробном мате Kuld-3, вероятно, связано с жизнедеятельностью бесцветных серобактерий, обнаруженных только в этом мате в средних количествах. Образованию минералов микроорганизмами способствует крайне низкая проницаемость матов, которая предполагает молекулярную диффузию в мате и сводит к минимуму эффект разбавления. В результате резкие изменения pH и Eh,

связанные с жизнедеятельностью микроорганизмов, приводят к изменению равновесия раствора и вызывают осаждение тех соединений, которые не способны находиться в растворе в этих условиях [2].

Заключение

Проведенные исследования показали, что экологические условия среды обитания микробных сообществ являются благоприятными для развития и функционирования бактерий различных физиологических групп. В термальных водах отмечен небольшой состав и низкая численность функциональных групп микроорганизмов, при этом преобладали тионовые бактерии, осуществляющие окисление соединений серы. В микробных матах наибольший состав физиологических групп микроорганизмов и их наиболее высокая численность выявлена в сообществах, развивающихся в более низкотемпературных источниках (45 °С). В микробных матах хемотрофные и органотрофные аэробные и анаэробные прокариоты принимают наиболее активное участие в биогеохимических циклах углерода и серы, что подтверждается высокими численностями сапрофитных, гидролитических, а также тионовых, сульфатредуцирующих и бесцветных серобактерий. Отмечена высокая интенсивность бионакопления микробными матами различных щелочных, щелочноземельных, радиоактивных элементов, РЗЭ и металлов. Микробные сообщества термальных источников Кульдур играют важную роль в осаждении силикатных минералов, кальцитов, серы и аморфных твердых веществ. Формированию этих минералов может способствовать физиологически индуцированное подщелачивание микросреды клетками цианобактерий или гетеротрофных микроорганизмов. Присутствие бактериальных клеток необходимо для минерализации. Бактерии обеспечивают центры зародышеобразования для отложения минералов. Полученные результаты позволяют рассматривать альго-бактериальные сообщества Кульдурских термальных источников в качестве активного преобразователя термальных вод и важного фактора биогеохимической миграции микроэлементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование распределения элементов между цианобактериальным сообществом и карбонатной постройкой термального источника методом РФА СИ / Е.В. Лазарева, С.М. Жмодик, И.В. Петрова, Ю.П. Колмогоров, М.А. Федорин, А.В. Брянская, О.П. Таран // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2012. – № 5. – С. 77–85.
2. Минералого-геохимические особенности бактериальных матов и травертинов термального источника Хойто-Гол (Восточные Саяны) / А.В. Татарин, Л.И. Яловик, Е.С. Кашкак, Э.В. Данилова, Е.А. Хромова, В.В. Хахинов, Б.Б. Намсараев // Геология и геофизика. – 2017. – № 1. – С. 60–73.
3. The accumulation of rare-earth yttrium ions by *Penicillium* sp ZD 28 / W. Wang, C. Xu, Y. Jin, Z. Zhang, R. Yan, D. Zhu // *AMB Express*. – 2020. – V. 10 (25). – P. 1–11.
4. Horiike T., Yamashita M. A new fungal isolate, *Penidiella* sp strain T9, accumulates the rare earth element Dysprosium // *Appl. Environ. Microbiol.* – 2015. – V. 81 (9). – P. 3062–3068.
5. Sasmaz M., Obek E., Sasmaz A. The accumulation of La, Ce and Y by *Lemna minor* and *Lemna gibba* in the Keban gallery water, Elazig Turkey // *Water and environment journal*. – 2018. – V. 32. – P. 75–83.
6. Sasmaz M., Senel G., Obek E. Boron bioaccumulation by the dominant macrophytes grown in various discharge water environment // *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. – 2021. – V. 106. – P. 1050–1058. DOI: 10.1007/s00128-021-03222-7.
7. Chemical component depositions in the microbial mats and travertine in the Khoito-Gol thermal spring (Eastern Sayan) / E.S. Kashkak, V.V. Khakhinov, E.V. Danilova, U.S. Oorzhak, O.P. Dagurova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – V. 908.
8. Douglas S., Beveridge T.J. Mineral formation by bacteria in natural microbial communities // *FEMS microbiology ecology*. – 1998. – V. 26. – P. 79–88.
9. Hoffmann T.D., Reeksting B.J., Gebhard S. Bacteria-induced mineral precipitation: a mechanistic review // *Microbiology*. – 2021. – V. 167. – № 4. – P. 1–13.
10. Porta G.D., Hoppert M., Hallmann C. The influence of microbial mats on travertine precipitation in active hydrothermal systems (Central Italy) // *The Depositional record*. – 2022. – V. 8. – № 1. – P. 165–209.
11. Химический и изотопный состав азотных термальных вод месторождения Кульдур (ЕАО, Россия) / Н.А. Харитонова,

- Л. А. Лямина, Г. А. Челноков, И. В. Брагин, А. А. Карабцов, И. А. Тарасенко, Х. Накамура, Х. Ивамори // Вестник Московского университета. Сер. 4 Геология. – 2020. – № 5. – С. 77–91.
12. Компаниченко В. Н., Потурай В. А. Вариации состава органического вещества в водах Кульдурского геотермального месторождения (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. – 2015. – № 4. – С. 96–107.
13. Калитина Е. Г., Харитонов Н. А., Вах Е. А. Распространение бактерий различных эколого-трофических групп в подземных термальных водах Кульдурского месторождения (Дальний Восток России) // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – № 5. – С. 351.
14. Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных микроорганизмов. – М.: Наука, 1989. – 288 с.
15. Selective bioaccumulation of rubidium by microalgae from industrial wastewater containing rubidium and lithium / P. Kastanek, F. Kastanek, O. Kronusova, I. Branyikova // Journal of applied phycology. – 2022. – V. 30. – № 1. – P. 461–467.
16. Microorganisms of various ecological-trophic groups in the saline ground waters of Primorsky Region (distribution, number, participation in accumulation of microelements) / E. G. Lebedeva, G. A. Chelnokov, I. V. Bragin, N. A. Kharitonova // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 98. – № 020061.
17. Maimulyati A., Prihadi A. R., Nurhidayati I. Adsorption of cobalt ion from aqueous solution using biomaterial of microalgae *Oscillatoria* sp isolated from Teluk Jakarta // Research journal of applied sciences, engineering and technology. – 2020. – V. 17. – № 1. – P. 7–12.
18. Adsorption of rare earth elements onto bacterial cell walls and its implication for REE sorption onto natural microbial mats / Y. Takahashi, X. Chatellier, K. Hattori, K. Kato, D. Fortin // Chemical geology. – 2005. – V. 219. – P. 53–67.
19. A rare earth element signature of bacteria in natural waters? / Y. Takahashi, T. Hirata, H. Shimizu, T. Ozaki, D. Fortin // Chemical geology. – 2008. – V. 244. – P. 569–583.
20. Биосорбция редкоземельных элементов и иттрия в водной среде гетеротрофными бактериями / Е. С. Казак, Е. Г. Калитина, Н. А. Харитонов, Г. А. Челноков, Е. В. Еловский, И. В. Брагин // Вестник Московского университета. Сер. 4 Геология. – 2018. – № 2. – С. 73–80.
21. Mechanism of vanadium (IV) resistance of the strains isolated from a vanadium titanomagnetite mining region / Y. Q. Yu, H. Q. Luo, W. Y. Tang, C. P. Yu, L. Lu, J. W. Li, J. Y. Yang // Ecotoxicol. Environ. Saf. – 2020. – V. 195. – № 1. – P. 110463.
22. Сорбция радионуклидов микроорганизмами из глубинного хранилища жидких низкоактивных отходов / Е. А. Лукьянова, Е. В. Захарова, Л. И. Константинова, Т. Н. Назина // Радиохимия. – 2008. – Т. 50. – С. 75–80.
23. Биосорбция ^{99}Tc и ^{238}U одноклеточными зелеными водорослями *Scenedesmus quadricauda* / Е. А. Максимова, Т. Г. Попова, Н. Н. Попова, А. М. Сафиулина, И. Г. Танаев // Вестник РУДН, серия Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2008. – № 2. – С. 85–92.
24. Microbial interaction with and tolerance of radionuclides: underlying mechanisms and biotechnological applications / M. Lopez-Fernandez, F. Jroundi, M. Ruiz-Fresnedo, M. Merroun // Microbial Biotechnology. – 2021. – V. 14. – № 3. – P. 810–828.
25. Nakajima A. Competitive biosorption of thorium and uranium by *Micrococcus luteus* // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 2004. – V. 260. – P. 13–18.
26. Inagak F., Motomura X., Ogata S. Microbial silica deposition in geothermal hot waters // Applied microbiology and biotechnology. – 2003. – V. 60. – P. 605–611.
27. Ikeda T. Bacterial biosilicification: a new insight into the global silicon cycle // Bioscience, biotechnology and biochemistry. – 2021. – V. 85. – № 6. – P. 1324–1331.
28. Fomina M., Skorochod I. Microbial interaction with clay minerals and its environmental and biotechnological implications // Minerals. – 2020. – V. 10. DOI: 10.3390/min10100861
29. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats / C. Dupraz, O. Braissant, A. Decho, R. S. Norman, P. Visscher, R. P. Reid // Earth-science reviews. – 2009. – V. 96. – № 3. – P. 141–162.
30. Arias D., Cisternas L. A., Rivas M. Biomineralization mediated by ureolytic bacteria applied to water treatment: a review // Crystals. – 2017. – V. 345. – № 7. DOI: 10.3390/cryst7110345

Поступила 02.08.2022 г.

Прошла рецензирование 20.09.2022 г.

Информация об авторах

Лебедева Е. Г., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии гипергенных процессов Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

Харитонов Н. А., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии Геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Брагин И. В., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохимии гипергенных процессов Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

Кузьмина Т. В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории аналитической химии Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

UDC 574.24:579.26

MICROBIAL COMMUNITIES OF THE KULDUR THERMAL SPRINGS AND THEIR PARTICIPATION IN THE ACCUMULATION OF MICROELEMENTS AND MINERAL FORMATION

Elena G. Lebedeva¹,
microbiol@mail.ru

Natalya A. Kharitonova²,
tchenat@mail.ru

Ivan V. Bragin¹,
bragin_ivan@mail.ru

Tatyana V. Kuzmina¹,
tkuzmina@mail.ru

¹ Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
159, 100 let Vladivostoka avenue, Vladivostok, 690022, Russia.

² M.V. Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie gory street, Moscow, 119234, Russia.

Relevance. Despite long-term regime observations of the temperature and chemical composition of thermal waters, there is practically no information about the microorganisms inhabiting thermal waters and bacterial mats and their biogeochemical role.

Purpose: to study the composition, the number of functional groups of bacteria in water and in microbial mats formed in different temperature zones and to investigate their role in the accumulation of trace elements and the formation of minerals in the Kuldur thermal springs.

The objects of study were the thermal underground waters of the Kuldur deposit of the following wells no. 1-87, 2-87, 3-87, 3-51, 5-51, as well as microbial mats formed in lakes and streams along the outflow of the Kuldur thermal springs.

Methods: chemical and microbiological methods. To analyze the contents of microelements in water, the samples were analyzed using an inductively coupled plasma mass spectrometer. Determination of the content of chlorophyll a in microbial mats was carried out spectrophotometrically in ethanol extracts. The number of different physiological groups of bacteria was determined on various selective media by the Koch method and limiting dilutions. Cultures were cleaned by the exhaustive stroke method. Elemental analysis of microbial mats was performed by the ISP-MS method on a spectrometer. The phase composition of minerals was determined using X-ray phase analysis on a diffractometer.

Results. It is shown that the thermal waters of the studied wells are alkaline, low mineralized, sodium predominates in the composition of cations, chlorine, fluorine and sulfate ions prevail among anions. Lithium, arsenic, and strontium dominate among microelements. In the studied wells of thermal waters, a low number of bacteria of various physiological groups was noted, while their number was higher in lower temperature waters. In microbial mats of different thermal zones, a different composition of physiological groups of bacteria was noted. Microorganisms of the geochemical cycle of sulfur, iron and manganese prevailed. The presence of cyanobacteria, which are characterized by the presence of chlorophyll a, was shown in the composition of all selected mats. A significant accumulation of many rare earth elements (especially light) – vanadium, as well as uranium and thorium by microbial communities – was revealed. In microbial mats, silicon was predominantly deposited in the form of quartz and plagioclase.

Key words:

Thermal springs, Kuldur, microbial mat, physiological groups, bacterial abundance, microelement accumulation, mineral precipitation.

REFERENCES

- Lazareva E. V., Zhmodik S. M., Petrova I. V., Kolmogorov Yu. P., Fedorin M. A., Bryanskaya A. V., Taran O. P. Investigation of the distribution of elements between the cyanobacterial community and the carbonate structure of the thermal spring by XRF SR. *Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies*, 2012, no. 5, pp. 77–85. In Rus.
- Tatarinov A. V., Yalovik L. I., Kashkak E. S., Danilova E. V., Khromova E. A., Khakhinov V. V., Namsaraev B. B. Mineralogical and geochemical features of bacterial mats and travertines of the Khoito-Gol thermal spring (East Sayan) *Russ. Geol. Geophys.*, 2017, vol. 1, pp. 60–73. In Rus.
- Wang W., Xu C., Jin Y., Zhang Z., Yan R., Zhu D. The accumulation of rare-earth yttrium ions by *Penicillium* sp ZD 28. *AMB Express*, 2020, vol. 25, no. 10, pp. 1–11.
- Horiike T., Yamashita M. A new fungal isolate, *Penidiella* sp strain T9, accumulates the rare earth element Dysprosium. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2015, vol. 81, no. 9, pp. 3062–3068.
- Sasmaz M., Obek E., Sasmaz A. The accumulation of La, Ce and Y by *Lemna minor* and *Lemna gibba* in the Keban gallery water, Elazig Turkey. *Water and environment journal*, 2018, vol. 32, pp. 75–83.
- Sasmaz M., Senel G., Obek E. Boron bioaccumulation by the dominant macrophytes grown in various discharge water environment. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 2021, vol. 106, pp. 1050–1058. DOI: 10.1007/s00128-021-03222-7.
- Kashkak E. S., Khakhinov V. V., Danilova E. V., Oorzhak U. S., Dagurova O. P. Chemical component depositions in the microbial mats and travertine in the Khoito-Gol thermal spring (Eastern Sayan). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 908, no. 012004.
- Douglas S., Beveridge T. J. Mineral formation by bacteria in natural microbial communities. *FEMS microbiology ecology*, 1998, vol. 26, pp. 78–88.
- Hoffmann T. D., Reeksting B. J., Gebhard S. Bacteria-induced mineral precipitation: a mechanistic review. *Microbiology*, 2021, vol. 167, no. 4, pp. 1–13.
- Porta G. D., Hoppert M., Hallmann C. The influence of microbial mats on travertine precipitation in active hydrothermal systems (Central Italy). *The Depositional record*, 2022, vol. 8, no. 1, pp. 165–209.
- Kharitonova N. A., Lyamina L. A., Chelnokov G. A., Bragin I. V., Karabtsov A. A., Tarasenko I. A., Nakamura H., Iwamori H. Chemical and isotopic composition of nitrogen thermal waters of the

- Kuldur deposit (JSC, Russia). *Moscow University Bulletin. Ser. 4 Geology*, 2020, no. 5, pp. 77–91. In Rus.
12. Kompanichenko V.N., Poturai V.A. Variations in the composition of organic matter in the waters of the Kuldur geothermal field (Far East of Russia). *Pacific Geology*, 2015, no. 4, pp. 96–107. In Rus.
 13. Kalitina E.G., Kharitonova N.A., Vakh E.A. Rasprostraneniye bakterii razlichnykh ekologo-troficheskikh grupp v podzemnykh termalnykh vodakh Kuldurskogo mestorozhdeniya (Dalnii Vostok Rossii) [Distribution of bacteria of various ecological and trophic groups in underground thermal waters of the Kuldurskoye deposit (Far East of Russia)]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2017, no. 5, p. 351.
 14. Kuznetsov S.I., Dubinina G.A. *Metody izucheniya vodnykh mikroorganizmov* [Methods for studying aquatic microorganisms]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 288 p.
 15. Kastanek P., Kastanek F., Kronusova O., Branyikova I. Selective bioaccumulation of rubidium by microalgae from industrial wastewater containing rubidium and lithium. *Journal of applied phycology*, 2022, vol. 8, no. 1, pp. 461–467.
 16. Lebedeva E.G., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kharitonova N.A. Microorganisms of various ecological-trophic groups in the saline ground waters of Primorsky Region (distribution, number, participation in accumulation of microelements). *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, no. 020061.
 17. Maimulyati A., Prihadi A.R., Nurhidayati I. Adsorption of cobalt ion from aqueous solution using biomaterial of microalgae *Oscillatoria* sp isolated from Teluk Jakarta. *Research journal of applied sciences, engineering and technology*, 2020, vol. 17, no. 1, pp. 7–12.
 18. Takahashi Y., Chatellier X., Hattori K., Kato K., Fortin D. Adsorption of rare earth elements onto bacterial cell walls and its implication for REE sorption onto natural microbial mats. *Chemical geology*, 2005, vol. 219, pp. 53–67.
 19. Takahashi Y., Hirata T., Shimizu H., Ozaki T., Fortin D. A rare earth element signature of bacteria in natural waters? *Chemical geology*, 2008, vol. 244, pp. 569–583.
 20. Kazak E.S., Kalitina E.G., Kharitonova, N.A., Chelnokov G.A., Elovskii E.V., Bragin I.V. Biosorption of rare-earth elements and yttrium by heterotrophic bacteria in an aqueous environment. *Moscow University geology bulletin*, 2018, vol. 73, no. 3, pp. 287–294.
 21. Yu Y.Q., Luo H.Q., Tang W.Y., Yu C.P., Lu L., Li J.W., Yang J.Y. Mechanism of vanadium (IV) resistance of the strains isolated from a vanadium titanomagnetite mining region. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2020, vol. 195, no. 1, pp. 110463.
 22. Lukyanova E.A., Zakharova E.V., Konstantinova L.I., Nazina T.N. Sorbtsiya radionukleidov mikroorganizmami iz glubinnogo khranilishcha zhidkikh nizkoaktivnykh otkhodov [Sorption of radionuclides by microorganisms from a deep storage of liquid low-level wastes]. *Radiochemistry*, 2008, vol. 50, pp. 75–80.
 23. Maksimova E.A., Popova T.G., Popova N.N., Safulina A.M., Tanaev I.G. Biosorbtsiya ^{99}Tc i ^{238}U odnokletochnymi zelenymi vodoroslyami *Scenedesmus quadricauda* [Biosorption of ^{99}Tc and ^{238}U by unicellular green algae *Scenedesmus quadricauda*]. *Bulletin of RUDN University, series Ecology and life safety*, 2008, no. 2, pp. 85–92.
 24. Lopez-Fernandez M., Jroundi F., Ruiz-Fresnedo M., Merroun M. Microbial interaction with and tolerance of radionuclides: underlying mechanisms and biotechnological applications. *Microbial Biotechnology*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 810–828.
 25. Nakajima A. Competitive biosorption of thorium and uranium by *Micrococcus luteus*. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 2004, vol. 260, pp. 13–18.
 26. Inagak F., Motomura X., Ogata S. Microbial silica deposition in geothermal hot waters *Applied microbiology and biotechnology*, 2003, vol. 60, pp. 605–611.
 27. Ikeda T. Bacterial biosilicification: a new insight into the global silicon cycle. *Bioscience, biotechnology and biochemistry*, 2021, vol. 85, no. 6, pp. 1324–1331.
 28. Fomina M., Skorochod I. Microbial interaction with clay minerals and its environmental and biotechnological implications. *Minerals*, 2020, vol. 10, pp. 1–54. DOI: 10.3390/min10100861.
 29. Dupraz C., Braissant O., Decho A., Norman R.S., Visscher P., Reid R.P. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-science reviews*, 2009, vol. 96, no. 3, pp. 141–162.
 30. Arias D., Cisternas L.A., Rivas M. Biomineralization mediated by ureolytic bacteria applied to water treatment: a review. *Crystals*, 2017, vol. 11, no. 7, p. 345. DOI: 10.3390/cryst7110345

Received: 2 August 2022.

Reviewed: 20 September 2022.

Information about the authors

Elena G. Lebedeva, Cand. Sc., senior researcher, Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

Natalya A. Kharitonova, Dr. Sc., professor, Moscow State University named M.V. Lomonosov.

Ivan V. Bragin, Cand. Sc., head of laboratory, Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

Tatyana V. Kuzmina, Cand. Sc., senior researcher, Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 553.411.071:550.4

АПРОБАЦИЯ СНЕЖНОЙ И АТМОГЕОХИМИЧЕСКОЙ СЪЕМОК ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ ОРЕЛОВ РАССЕЯНИЯ ПОГРЕБЕННОЙ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ТУРУНТАЕВСКОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Гаврилов Роман Юрьевич¹,
GavrilovRY@tpu.ru

Соболев Игорь Станиславович²,
geolsob@yandex.ru

Соболева Надежда Петровна¹,
sobnadi@yandex.ru

Ворошилов Валерий Гаврилович¹,
v_g_v@tpu.ru

Тентюков Михаил Пантелеймонович³,
tentukov@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² ООО «Гео Сервис»,
Россия, 634050, г. Томск, ул. Учебная, 5-21.

³ Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина,
Россия, 167001, г. Сыктывкар, Октябрьский пр., 55.

Актуальность исследования связана с необходимостью внедрения в практику прогнозно-поисковых работ новых методик глубинного геохимического картирования.

Цель: выявление и оценка особенностей аномального геохимического поля над перекрытым свинцово-цинковым оруденением на основе снежного и атмогеохимического опробования.

Методы: геохимическое картирование, математическая обработка результатов геохимических работ, моделирование геохимических полей методами многомерной статистики, геолого-генетическая интерпретация геохимических данных.

Объект: геохимические ореолы Турунтаевского свинцово-цинкового рудопроявления.

Результаты. В результате обработки геохимических данных установлено, что большинство химических элементов в снежном покрове и почвенном воздухе характеризуются низкой степенью неоднородности распределения их концентраций, что свидетельствует об отсутствии на площади контрастных геохимических ореолов. После математической обработки геохимических данных установлено, что наиболее контрастные аномалии основных рудных элементов – Pb+Zn, As, Sn и Cu – и их нормированных содержаний расположены над скважинами, вскрывшими рудную минерализацию. По результатам снежного опробования в распределении всех рудных элементов: Pb+Zn, As, Sn и Cu, выделяются также ложные аномалии, расположенные в пределах развития лесной растительности. Полученные данные дают основание утверждать, что точно установить в снежном покрове наложенные ореолы по изменению концентраций рассеянных элементов не представляется возможным. Однако результаты корреляционного и регрессионного анализов свидетельствуют о наличии взаимосвязей между элементами со схожими геохимическими свойствами. Вероятнее всего, в данном случае проявляется дифференциация компонентов по главным формам нахождения: растворенная и нерастворенная. Целый ряд элементов проявляет взаимосвязь как с жидкой, так и с твердой фазой. Наличие значимых взаимосвязей рассеянных элементов с маркерами нерастворенной (редкоземельные элементы) и растворенной (Na+Cl) форм нахождения позволяет использовать индикаторные отношения для обнаружения в снежном покрове слабо проявленных наложенных ореолов.

Ключевые слова:

полиметаллы, Турунтаевское рудопроявление, геохимические аномалии, снежное и атмогеохимическое опробование, математическая статистика.

Постановка задачи

В настоящее время вопрос выявления новых рудных месторождений стоит достаточно остро в связи с жесткой привязкой бюджета Российской Федерации к минерально-сырьевым ресурсам, в том числе твердым полезным ископаемым. Большинство месторождений, выходящих на дневную поверхность, уже выявлено, что предполагает опосредованное закрытие и перекрытие перспективных площадей [1, 2]. В свою очередь данный вид геологоразведочных работ обладает

определенной спецификой, обусловленной проведением как высокоточных аналитических исследований, так и математической обработки полученных результатов опробования. За последние десятилетия уровень аналитической базы существенно вырос, что позволяет проводить определение содержания химических элементов с крайне низкими концентрациями.

Одним из потенциально значимых, но в то же время и недостаточно обоснованных методов поисков месторождений полезных ископаемых на закрытых

территориях является выявление геохимических аномалий на перспективных площадях по результатам снежной съемки. Снег, занимающий значительные площади в ряде стран северного полушария, может быть использован как источник информации не только о пыле-аэрозольных отложениях [3–8], но и как критерий выявления месторождений полезных ископаемых [9–11].

К несомненным преимуществам использования данного вида опробования следует отнести и то, что снежный покров является субстратом, накапливающим вещества текущего снежного сезона, что, при методичеки обоснованном подходе к опробованию, исключает возможность попадания веществ, аккумуляировавшихся в почвенном или породном субстрате на протяжении всей истории его существования. Также следует отметить простоту выполнения отбора проб с ограниченным количеством необходимых приспособлений и пробоподготовки – снеготаяния.

Снег как естественный природный субстрат является экранирующей и депонирующей средой не только для пыле-аэрозольных образований, но и для соединений, поступающих из глубоких горизонтов земной коры. Одной из главных и наиболее трудных задач при интерпретации полученных аналитических данных снежного опробования является разделение двух источников аккумуляции инородных для снежного покрова веществ.

Возможность глубинной эмиссии вещества в снежный покров обосновывается известными механизмами миграции подвижных форм химических соединений в осадочные отложения, перекрывающие глубоко залегающие минеральные скопления [12–17]. Зимой в результате нарушения теплообмена между почвой и приземной атмосферой и физическим свойствам снега в снежной толще в зоне контакта «снег–почва» возникает градиент температур и водяного пара. В итоге в приповерхностной части сезоннопромерзающих почв формируется криогенный солевой ореол из легкорастворимых форм элементов-примесей за счет их диффузионного переноса в составе паров почвенной влаги в приконтактный слой снега, что вызывает устойчивый приток из почвы [18].

Целью настоящей работы является апробация возможностей снежной и атмогеохимической съемок при проведении поисковых работ на примере перекрытого полиметаллического оруденения.

Геологическое строение рудопоявления

Турунтаевское рудопоявление цинка, как и ряд других рудопоявлений Томской области, сосредоточено в основном в пределах Ташминского полиметаллического рудного узла, располагающегося на восточном фланге Томского рудного района [19].

Рудный узел располагается в зоне сочленения структур Кузнецкого Алатау и Кольвань-Томской складчатой зоны (рис. 1). В его геологическом строении принимают участие породы всех выделяемых в районе структурно-фациальных зон и подзон от мраморов и амфиболитов рифея до терригенных отложений нижебалахонской серии верхнего карбона. Руд-

ный узел располагается во фронтальной и прифронтальной частях Томского шарьяжа. Восточной границей узла является зона субмеридиональных разломов, контролирующих протрузии гипербазитов, западной границей служит Урбейский разлом. На севере рудный узел ограничен диагональными разломами Киргизской системы, а на юге – Омутнинскими разломами. Основной рудоконтролирующей структурой узла является диагональная Щербакская зона разломов восток-северо-восточного простирания. К структурным узлам, образованным этой диагональной зоной с продольными субмеридиональными разломами, приурочены основные лито- и гидрогеохимические аномалии узла, а также известные рудопоявления полиметаллов. По комплексу поисковых признаков в рудном узле выделяется пять потенциальных рудных полей: Турунтаевское, Киргислинское, Леспромхозовское, Барнашовское и Кульское. Они имеют линейную форму, обусловленную приуроченностью к зонам субмеридиональных разломов, поэтому в дальнейшем называются потенциальными рудными зонами.



Рис. 1. Схематическое расположение Турунтаевского полиметаллического рудопоявления

Fig. 1. Schematic location of the Turuntaevsky polymetallic ore occurrence

Турунтаевская рудная зона расположена в 65 км от Томска, у села Турунтаево. Она выявлена в 1964 г. А.Ф. Рубцовым и др. при проведении геологосъемочных работ масштаба 1:50000 Томской геологоразведочной экспедицией. С 1964 по 1983 гг. в пределах зоны пробурено 230 скважин (42917 п.м.). Зона прослежена по простиранию на 12 км при ширине 1...2 км и вскрыта скважинами на глубину до 500 м. По комплексу геофизических и геохимических признаков протяженность рудной зоны составляет около 40 км от р. Латат на севере до устья р. Омутной на юге. Рудная зона приурочена к крутопадающим разрывным нарушениям субмеридионального (Кузнецко-Алатауского) направления. В наиболее богатой части минерализация приурочена к зоне контакта между черными филлитовидными сланцами и андезибазальтами единисской свиты (рис. 2)

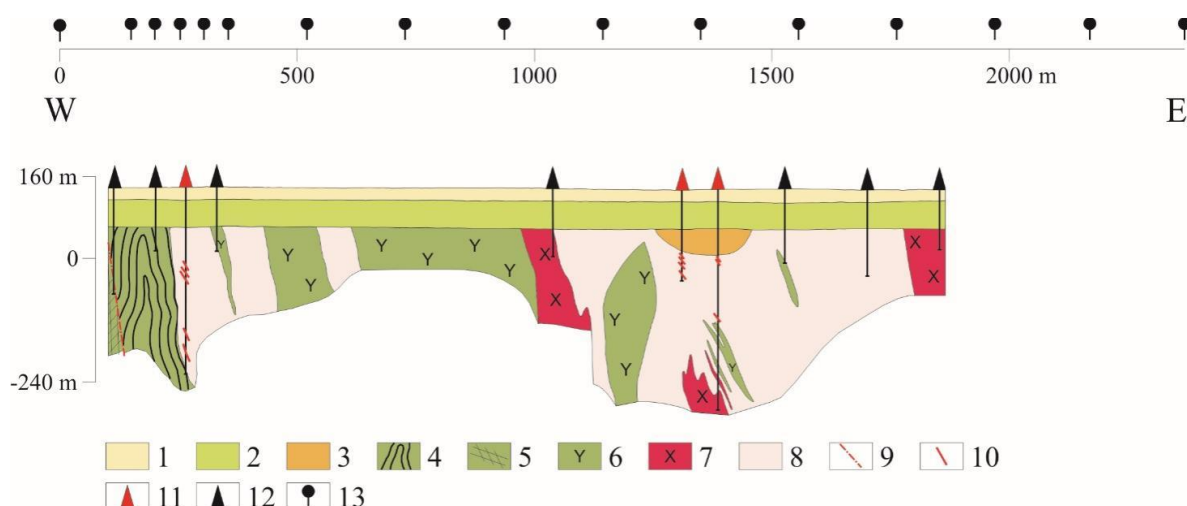


Рис. 2. Геологический разрез через центральную часть Турунтаевского свинцово-цинкового рудопоявления с проекцией линии геохимического опробования: 1 – четвертичная система: суглинки, глины, галечники, гравелистые пески; 2 – верхний мел (s-t): глины, пески; 3 – нижний девон: алевролиты, песчаники, гравелиты, конгломераты, базальтовые порфириды; 4–6 – нижний кембрий: филлиты (4), милониты и брекчии тектонических зон (5), андезитовые порфириды (6); 7 – магматические образования: микродиориты (δO); 8 – кварц-карбонатные метасоматиты; 9 – разлом; 10 – рудный интервал; 11, 12 – скважины: рудные (11), безрудные (12); 13 – точки опробования

Fig. 2. Geological section through the central part of the Turuntaevsky lead-zinc ore occurrence with a projection of the geochemical sampling line: 1 – Quaternary system: loams, clay, bench gravels, gravelly sands; 2 – Upper Cretaceous (s-t): clay, sands; 3 – Lower Devonian: siltstone, sandstone, gristone, conglomerate, basaltic porphyry; 4–6 – Lower Cambrian: phyllites (4), mylonite and fault breccia (5); andesite porphyry (6); 7 – intrusive: microdiorite (δO); 8 – quartz-carbonate wallrock alteration; 9 – fault; 10 – ore interval; 11–12 – holes: ore (11), blank (12); 13 – sampling points

Методика исследования

Опробование снежного покрова осуществлялось по профилю тестовых исследований, совпадающему с линией ранее проведенных геологических работ различного содержания. Шаг пробоотбора варьировал от 50 до 200 м (рис. 2). Снежное опробование проведено в начале марта 2019 г. Снег собирался в чистую пластиковую тару из стенок шурфов, выше горизонта прошлогодней травянистой растительности в среднем на высоте 30 см от земной поверхности. Отобрано 16 проб объемом не менее 1 литра каждая. Вытаивание снега происходило естественным образом в закрытых сосудах при комнатной температуре. Перед анализом талая вода фильтровалась для удаления крупных взвешенных частиц через обеззоленные бумажные фильтры – «синяя лента». Фильтры предварительно десятикратно отмывались деионизированной водой.

В летний период в точках отбора снежного материала осуществлено активное опробование почвенного воздуха. Активный сбор вещества проводился по методике, реализуемой с помощью специального устройства с вкручиваемым в почву конусовидным пробоотборником [20]. Откачки почвенного воздуха осуществлялись в съемные одноразовые жидкостные коллекторы (liquid collector). В качестве жидкости использовался 3 % HNO_3 , приготовленный из ультрачистой HNO_3 и деионизированной воды. В газовой арматуре устройства перед коллектором устанавливалась мембрана из ацетат целлюлозы с порами 0,45 μm . После откачки из шпура почвенного воздуха со скоростью 20 л/мин на протяжении 20 мин коллекторы герметично закрывались.

Химический состав талой воды и жидкости коллекторов анализировался методом ICP-MS на содержание 72 химических элементов с применением масс-спектрометра NexION 300 D в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета.

Содержания целого ряда элементов в снеготалой воде и жидкости коллектора находятся на грани предела обнаружения анализом ICP-MS. В случае определения содержания элемента менее чем в 80 % проб такой элемент исключался из последующей обработки. Содержания ниже порога чувствительности анализа, в случае отсутствия определения концентраций в единичных пробах, были заменены на содержания, составляющие 2/3 от предела их обнаружения. В результате геохимический спектр снеготалой воды и жидкости коллекторов представлен одинаковым набором, состоящим из 56 элементов. При обработке геохимических данных истинные содержания нормировались на медианное значение соответствующего элемента. Это позволило привести в одну размерность как данные по различным элементам, так и результаты опробования различных субстратов. Отмечается характерная для многих природных сред значимая положительная корреляционная связь в распределении редких земель (определено 15 элементов), что позволило представить их в виде суммы (REE).

Результаты исследования

Большинство химических элементов характеризуются однородным и неоднородным характером рас-

пределения (табл. 1), что свидетельствует об отсутствии на площади контрастных ореолов ими образованных. Кроме того, некоторые рудные элементы – индикаторы оруденения – на изучаемой площади характеризуются концентрациями, не превышающими фоновые значения. Для снега это As, Cd, Pb, Sb, Zn, для жидкости коллекторов – As, Sb.

По результатам кластер-анализа переменных можно выделить три группы элементов. В первой группе, где наиболее подвижными являются такие элементы, как Na и Cl, обособились преимущественно лито-

фильные элементы. Для данной группы элементов значительную роль играет водо-растворенное состояние. Большинство связанных с парой Na-Cl компонентов относятся к талассофилам. Во второй группе, кроме Mo и Ni, выделяются как литофильные, так и халькофильные элементы. Третья, наиболее представительная группа, включающая в себя редкоземельные элементы, характеризуется преимущественно лито-халькофильной специализацией. Элементы второй и третьей ассоциаций, вероятно, связаны с частичками почв и горных пород.

Таблица 1. Дифференциация распределения химических элементов по значениям коэффициента вариации (%) в снеге и жидкостных коллекторах Турунтаевского рудопоявления

Table 1. Differentiation of the distribution of chemical elements by the values of the coefficient of variation (%) in snow and liquid reservoirs of the Turuntaevsky ore occurrence

Область исследования Study area	N	Градации неоднородности геохимической структуры Gradation of geochemical pattern inhomogeneity (Lithogeochemical..., 1987)		
		Однородный Homogeneous (< 39 %)	Неоднородный Inhomogeneous (40 ... 79 %)	Весьма неоднородный Highly inhomogeneous (80 ... 159 %)
снег snow	16	As, Ba, Br, Cd, Cl, I, Na, Pb, Sb, Zn	Al, B, Ca, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, K, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Rb, REE, S, Si, Sn, Sr, U, Th, Ti, Tl, V, Zr	Ag, Hf, Sc
жидкость коллекторов liquid of collectors	16	Al, As, Ba, Ca, Cs, Ga, Hf, K, Li, Mo, Na, Rb, REE, Sb, Sc, Sr, Zr	B, Br, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, Fe, I, Mg, Mn, Ni, P, S, Si, Sn, Th, Ti, Tl, U, V, Zn	Ag, Ge, Pb

Дендрограмма для 42 переменных
Метод Варда
1-г Пирсона

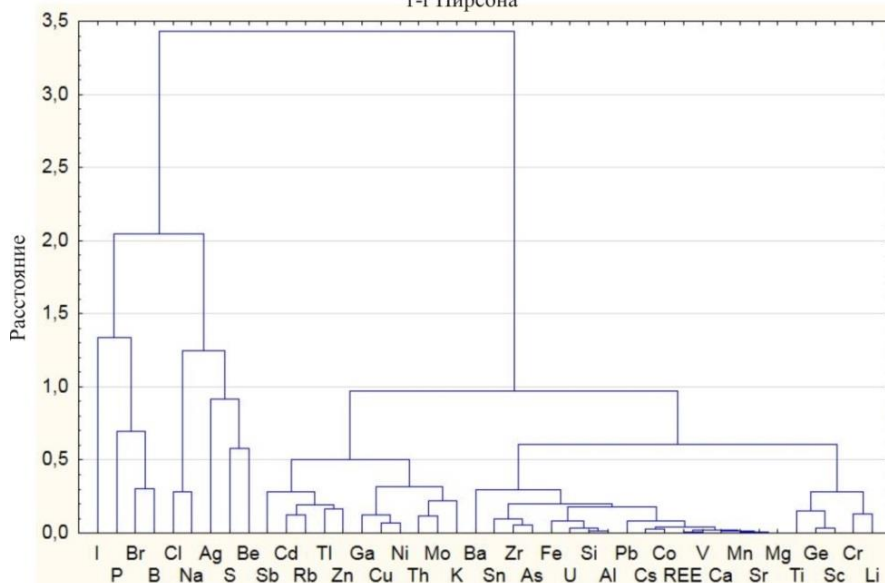


Рис. 3. Результаты кластер-анализа по снеготалой воде
Fig. 3. Results of cluster analysis for snow melted water

Установленные взаимосвязи между элементами позволяют сделать предположение о доминировании нерастворенной фазы в снежном покрове над Турунтаевским рудопоявлением.

Регрессионный анализ подтвердил дифференциацию химических элементов по их взаимосвязи с «опорными компонентами» – Ba, Na+Cl и REE. Выбор REE обусловлен высокой статистической устойчивостью суммы их содержаний, которая обеспечена данными о концентрации 15 элементов. Оценка зависимостей проводилась по значениям коэффициента

концентрации (КК), а суммы Pb+Zn, Na+Cl и REE делились на числа, равные количеству компонентов в показателе. Этот принцип применялся для всех суммарных показателей коэффициентов концентраций. Парный регрессионный анализ демонстрирует, что взаимосвязи с «опорными компонентами» многих химических элементов удовлетворительно описываются линейной функцией (табл. 2). Наличие линейных зависимостей свидетельствует о дифференциации химических элементов по их геохимическим свойствам и формам нахождения. Слабые водные ми-

гранты твердых частиц по своему поведению близки с REE. Химические элементы, способные к образованию солей, схожи по распределению с Na+Cl. Обособляется группа компонентов смешанных фазовых состояний, к которой, по всей видимости, относятся Ba и поливалентные элементы, преимущественно халькофилы. Небольшое количество проб не позволяет говорить о статистической устойчивости

линейных зависимостей. Тем не менее полученные результаты не противоречат классическим представлениям о миграции и концентрировании химических элементов в различных природных средах (вода, горные породы, почвы). То же самое относится к аэрозолям и атмосферным осадкам, для которых идентификация антропогенной составляющей производится на основе закономерностей линейных связей [21, 22].

Таблица 2. Дифференциация по степени аппроксимации к функции линейной регрессии по результатам снежного опробования Турунтаевского рудопроявления

Table 2. Differentiation by the degree of approximation to the linear regression function according to the results of snow sampling of the Turuntaevsky ore occurrence

Компоненты абсциссы Abscissa components	Коэффициент аппроксимации (R ²)/Approximation factor (R ²)					
	0,3–0,39	0,4–0,49	0,5–0,59	0,6–0,69	0,7–0,79	≥ 0,8
REE		Cl, Na, Zn	Cd, Cu, P, Sb, Tl	Ba, Cr, Li, Mo	Fe, K, Ni, Rb, Sc, Sn	Al, As, Ca, Co, Cs, Ga, Mg, Mn, Pb, Si, Sr, Th, Ti, U, V, Zr
Na+Cl	Al, As, Ca, Cd, Co, Cs, Cu, Mg, Mn, Sc, Sr, Ti, U, Zr	Rb, Zn	Tl			
Ba	As, K, Rb, Sb, Si, Sn, Th, Zr	Cr, Fe, Li, Ni, Pb	Al, Co, Ga, V, Mg, Mn, P, Ti	Ca, Cs, Sr, U		

Обсуждение результатов и выводы

В результате обработки геохимических данных опробования почвенного воздуха и снежного покрова установлено, что основные рудные элементы выделяются повышенными концентрациями над минерализованной зоной полиметаллического оруденения. Наиболее контрастные аномалии элементов-спутников оруденения – As, Sn и Cu – и их нормированных содержаний (рис. 4, а–е) расположены над скважинами, вскрывшими рудную минерализацию.

Комплексные показатели (КП) Pb+Zn и Pb+Zn/REE также характеризуются высокими концентрациями над зоной рудной минерализации по результатам опробования обоих субстратов (рис. 4, ж, з). Вместе с тем по результатам снежного опробования прослеживается взаимосвязь в распределении аддитивного показателя Pb+Zn и REE, что приводит к «затенению» полезного сигнала от зон рудной минерализации.

На рис. 4, Б, по результатам снежного опробования, в распределении всех рудных элементов: Pb+Zn, As, Sn и Cu, устанавливаются также ложные аномалии, связанные с повышенным содержанием REE в пределах развития лесной растительности. Таким образом, процедура нормирования рудных элементов на REE, прежде всего, по результатам снежного опробования, позволяет избавиться от ложных аномалий и увеличить полезный сигнал от рудного объекта.

По данным опробования почвенного воздуха и снежного покрова КП REE и Na+Cl не демонстрируют аномально высоких значений над установленными рудными зонами, а по результатам снежного опробования REE проявляет пространственную взаимосвязь с расположением древесно-кустарниковой растительности (рис. 4, ж, з). В то же время оба КП характеризуются крайне неоднородным распределением концентраций над оруденением, вскрытым единичной скважиной (начало профиля), что, по нашему мнению, может свидетельствовать о наличии относительно мощной зоны трещиноватости.

По профилю опробования происходит чередование двух типов ландшафтов, которые представлены лесом и открытыми луговыми пространствами. Часть последних не используется в настоящее время и зарастает редкими молодыми деревьями и кустарником. Сопоставление ландшафтных условий с изменчивостью REE по результатам снежного опробования показывает, что в целом наиболее высокие значения содержаний принадлежат отрезкам с развитой лесной растительностью. Эта зависимость объясняется захватом снегом вещества, которое было накоплено на кронах деревьев, преимущественно до периода снегооста [23, 24]. Изменчивость спектра концентрирующихся химических элементов в снеге в связи с видовым составом деревьев установлена также в [24].

Низкая вариативность геохимического поля свинцово-цинкового оруденения является первопричиной отсутствия контрастных ореолов элементов в снежном покрове.

Полученные данные дают основание утверждать, что точно установить в снежном покрове наложенные ореолы по изменению собственных концентраций рассеянных элементов не представляется возможным. Однако результаты корреляционного и регрессионного анализов свидетельствуют о наличии взаимосвязей между элементами со схожими геохимическими свойствами. Вероятнее всего, в данном случае проявляется дифференциация компонентов по главным формам нахождения: растворенная и нерастворенная. Целый ряд элементов проявляет взаимосвязь как с жидкой, так и с твердой фазой. Наличие значимых взаимосвязей рассеянных элементов с маркерами нерастворенной (REE) и растворенной (Na+Cl) форм нахождения позволяет использовать индикаторные отношения для обнаружения в снежном покрове слабо проявленных наложенных ореолов. Изменчивость фоновых концентраций в геохимическом поле прежде всего связана с изменчивостью твердых фаз, содержащихся в снежном покрове.

Заключение

В качестве природного субстрата снег представляет собой интерес как депонирующая среда при поисках месторождений полезных ископаемых в странах, характеризующихся устойчивым снежным покровом на протяжении длительного времени. Процесс опробования снега достаточно прост и малозатратен как с экономической, так и с временной точки зрения. Еще одним очевидным преимуществом является то, что снег представляет собой субстрат, характеризующий геологические процессы, происходящие в настоящее время.

Опробование почвенного воздуха возможно на любых геологических объектах. Процесс опробования достаточно прост при наличии соответствующего оборудования. Вещественный состав опробуемого воздуха также характеризует современные геологические процессы, протекающие в точке наблюдения.

Одной из главных причин, затрудняющих проведение исследований как снежного покрова, так и почвенного воздуха, является низкое содержание химических элементов. Это заставляет использовать высокоточные и высокочувствительные методы анализов, не допускающих каких-либо отклонений от методики их проведения. Определённую сложность при этом представляет так называемая «увязка» результатов анализов разного времени и/или различных лабораторий. Основными решениями данной проблемы могут служить как выполнение внутреннего и внешнего контроля анализов, так и создание эталонов, на которые можно будет ориентироваться лабораториям.

Вклад соединений, проникающих из глубин земной коры в снежной покров, сопоставим с привнесением

вещества из других источников. Корреляционные зависимости отражают типичные для природных образований формы нахождения: твердую, водорастворенную и парогазовую. Вероятно, фоновая составляющая локального геохимического фона в большей степени связана с твердой фазой, представленной частичками почвы и горных пород, семенами и чешуйками различных видов растительности. Установлено различие в накоплении элементов в снежном покрове в зависимости от степени открытости или закрытости (залесенности) ландшафтов. В качестве маркера твердой фазы нами была использована сумма REE. Нормирование концентраций рассеянных элементов на статистически устойчивую сумму REE позволило усилить полезный сигнал в виде геохимических ореолов над рудным объектом. Несмотря на то, что при расчёте статистических показателей использовано ограниченное количество проб, можно высказать предположение, что использование нелинейных функций позволит более точно охарактеризовать фоновые значения геохимического поля и выявлять наложенные геохимические ореолы в снежном покрове, связанные с глубинным массопереносом вещества.

Полученные результаты позволяют проявлять умеренный оптимизм в отношении использования снежной съемки и почвенного воздуха при поисках глубоко залегающих месторождений полезных ископаемых. Необходимо продолжить работы в данном направлении, в том числе и для решения выявившихся проблемных точек: методика отбора проб в зависимости от ландшафтных условий, обработка проб, точность аналитических исследований, методы обработки геохимической информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gonzales-Alvarez I., Gonsalves V.A., Carranza E.J.M. Challenges for mineral exploration in the 21st century: targeting mineral deposits under cover // *Ore Geology Reviews* – 2020. – V. 126. – 103785.
- Chemical diagenesis in near-surface zone above oil fields in geochemical exploration / I.S. Sobolev, N.P. Bredikhin, T. Bratec, A.Yu. Falk, O.S. Tolkachev, L.P. Rikhvanov, P.A. Tishin // *Applied Geochemistry*. – 2018. – V. 95. – P. 33–44.
- Сопряженный анализ гранулометрического состава аэрозольного вещества в приземном воздухе и снежном покрове: влияние воздушных масс на распределение аэрозольных частиц / М.П. Тентюков, К.А. Шукуров, Б.Д. Белан, Д.В. Симоненков, Е.Г. Язык, В.И. Михайлов, В.С. Бучельников // *Оптика атмосферы и океана*. – 2021. – Т. 34. – № 8 (391). – С. 577–584.
- Загрязнение поверхности снега полициклическими ароматическими углеводородами при образовании изморози / М.П. Тентюков, Д.Н. Габов, Д.В. Симоненков, Е.Г. Язык // *Лёд и снег*. – 2019. – Т. 59. – № 4. – С. 483–493.
- Распределение редкоземельных элементов в пробах снега – чувствительный показатель загрязнения окружающей среды / С.Ф. Винокуров, Д.Б. Петренко, В.А. Сычкова, Н.П. Тарасова // *Доклады АН*. – 2014. – Т. 456. – № 3. – С. 320–325.
- Анализ содержания элементов в аэрозолях по данным пассивного пробоотбора на обсерватории «Фоновая» / В.С. Бучельников, А.В. Таловская, Е.Г. Язык, Д.В. Симоненков, Б.Д. Белан, М.П. Тентюков // *Оптика атмосферы и океана*. – 2020. – Т. 33. – № 6. – С. 453–458.
- Estimation of air pollution due to gas glaring from remote observations of flare thermal radiation / M.N. Alekseeva, V.F. Raputa, T.V. Yaroslavtseva, I.G. Yashchenko // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2020 – V. 33. – № 3. – P. 289–284.
- Современный золотой морфолитогенез: изученность, региональные проявления / Н.С. Евсеева, Е.Г. Язык, З.Н. Квасникова, А.С. Батманова, В.С. Бучельников // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 96–107.
- Погребняк Ю.Ф., Татьянкина Э.М., Толочко В.В. Ореолы рассеяния золота в снежном покрове на поверхности рудопроявления // *Доклады АН СССР*. – 1979. – Т. 245. – № 4. – С. 953–955.
- Snow in mineral exploration – examples and practices in glaciated terrain / A. Taivalkoski, P. Sarala, S. Lukkari, D. Sutherland // *Journal of Geochemical Explorations*. – 2019. – V. 200. – № 5. – P. 1–12.
- Kristiansson K., Malmqvist L., Persson W. Geogas prospecting: a new tool in the search for concealed mineralizations // *Endeavour, New Series*. – 1990. – V. 14. – № 1. – P. 28–35.
- Kristiansson K., Malmqvist L. Evidence for nondiffusive transport of ²²²Rn in the ground and new physical model for the transport // *Geophysics* – 1982. – V. 47. – № 10. – P. 1444–1452.
- Kristiansson K., Malmqvist L. Trace elements in the geogas and their relation to bedrock composition // *Geoexploration*. – 1987. – V. 24. – P. 517–534.
- Schumacher D. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments // *Hydrocarbon Migration and its Nearsurface Expression: AAPG Memoir*. – 1996. – V. 66. – P. 71–89.
- Saunders D.F., Bursan K.R., Thompson C.K. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations // *AAPG Bull.* – 1999. – V. 83. – № 1. – P. 170–185.
- Finding deeply buried deposits using geochemistry / E.M. Cameron, S.M. Hamilton, M.I. Leybourne, G.E.M. Hall, M.B. McClenaghan // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2004. – V. 4. – P. 7–32.

17. Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden. P. I: methodologies and field investigation at the Marsh Zone gold property / S.M. Hamilton, E.M. Cameron, M.B. McClenaghan, G.E.M. Hall // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2004. – V. 4. – P. 33–44.
18. Геологическое строение и полезные ископаемые Западной Сибири. Т. 2. Геологическое строение / науч. ред. чл.-кор. РАН А.В. Коныгин, канд. геол.-минерал. наук В.Г. Свиридов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. – 254 с.
19. Физические свойства снежного покрова и механизм формирования геохимических барьеров в снежной толще / М.П. Тентюков, Г.В. Игнатъев, И.С. Соболев, Р.Ю. Гаврилов // *Вестник геонаук*. – 2022. – № 5 (329). – С. 26–37.
20. Wang M., Gao Y., Liu Y. Progress in the collection of geogas in China // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2008. – V. 8. – P. 183–190.
21. Dasch J.M., Wolff G. Trace inorganic species in precipitation and their potential use in source apportionment studies // *Water, Air and Soil Pollution*. – 1989. – V. 43. – P. 401–412.
22. Kowalczyk G.S., Gordon G.E., Rheingrover S.W. Identification of atmospheric particulate source in Washington, DC, using chemical elemental balances // *Environmental Science & Technology*. – 1982. – V. 16. – № 2. – P. 79–90.
23. Deposition. Forest condition monitoring in Finland (National report 1999) / A. Lindroos, J. Derome, K. Derome, K. Niska // *The Finnish forest research institute, research papers*. – 2000. – V. 782. – P. 61–69.
24. Pristova T.A., Vasilevich M.I. Chemical composition of snow cover in middle-taiga forest in Komi Republic // *Geochemistry International*. – 2011. – V. 49. – № 2. – P. 199–206.

Поступила: 17.11.2022 г.

Дата рецензирования: 02.12.2022 г.

Информация об авторах

Гаврилов Р.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Соболев И.С., кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог ООО «Гео Сервис».

Соболева Н.П., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ворошилов В.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Тентюков М.П., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры экологии и геологии Института естественных наук Сыктывкарского государственного университета им. Питирима Сорокина.

UDC 553.411.071:550.4

APPROBATION OF SNOW AND ATMOGEOCHEMICAL SURVEYS FOR MAPPING DISPERSION HALOES OF BURIED POLYMETALLIC MINERALIZATION ON THE EXAMPLE OF THE TURUNTAEVSKY ORE OCCURRENCE (TOMSK REGION)

Roman Yu. Gavrilov¹,
gavrilovry@tpu.ru

Igor S. Sobolev²,
geolsob@yandex.ru

Nadezhda P. Soboleva¹,
sobnadi@yandex.ru

Valeriy G. Voroshilov¹,
v_g_v @tpu.ru

Mikhail P. Tentyukov³,
tentukov@yandex.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Geo Service LLC,
5-21, Uchebnaya street, Tomsk, 634028, Russia.

³ Pitirim Sorokin Syktyvkar State University,
55, Oktyabrsky avenue, Syktyvkar, 167001, Russia.

The relevance of the study is related to the need to introduce new methods of deep geochemical mapping into the practice of forecasting and prospecting.

Purpose: to identify and evaluate the features of the anomalous geochemical field above the overburdened lead-zinc mineralization based on snow and atmogeochemical sampling.

Methods: geochemical mapping, mathematical processing of the results of geochemical work, modeling of geochemical fields using multivariate statistics, geological and genetic interpretation of geochemical data.

Object: geochemical halos of the Turuntaevsky lead-zinc ore occurrence.

Results. As a result of the processing of geochemical data, it was found that most of the chemical elements in the snow cover and soil air are characterized by a low degree of heterogeneity in the distribution of contents, which indicates the absence of contrasting geochemical halos in the area. After mathematical processing of geochemical data, it was found that the most contrasting anomalies of the main ore elements Pb+Zn, As, Sn and Cu and their normalized contents are located above the wells that exposed ore mineralization. According to the results of snow testing in the distribution of all ore elements: Pb+Zn, As, Sn and Cu, false anomalies are also distinguished, located within the development of forest vegetation. The data obtained give grounds to assert that it is not possible to accurately determine the superimposed halos in the snow cover from changes in the concentrations of trace elements. However, the results of correlation and regression analyzes indicate the presence of relationships between elements with similar geochemical properties. Most likely, in this case, the components are differentiated according to the main forms of occurrence: dissolved and undissolved. A number of elements exhibit a relationship with both liquid and solid phases. The presence of significant interrelations of trace elements with markers of undissolved (rare-earth elements) and dissolved (Na+Cl) occurrence forms makes it possible to use indicator ratios to detect weakly manifested superimposed halos in the snow cover.

Key words:

polymetals, Turuntaevsky ore occurrence, geochemical anomalies, snow and atmogeochemical surveys, mathematical statistics.

REFERENCES

1. Gonzales-Alvarez I., Gonsalves V.A., Carranza E.J.M., Challenges for mineral exploration in the 21st century: targeting mineral deposits under cover. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 126, 103785.
2. Sobolev I.S., Bredikhin N.P., Bratec T., Falk A.Yu., Tolkachev O.S., Rikhvanov L.P., Tishin P.A. Chemical diagenesis in near-surface zone above oil fields in geochemical exploration. *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 95, pp. 33–44.
3. Tentyukov M.P., Shukurov K.A., Belan B.D., Simonenkov D.V., Yazikov E.G., Mikhailov V.I., Buchelnikov V.S. Conjugated analysis of the granulometric composition of aerosol matter in the surface air and snow cover: the effect of air masses on the distribution of aerosol particles. *Optics of the atmosphere and ocean*, 2021, vol. 34, no. 8 (391), pp. 577–584.
4. Tentyukov M.P., Gabov D.N., Simonenkov D.V., Yazikov E.G. Pollution of the snow surface with polycyclic aromatic hydrocarbons during the formation of frost. *Ice and snow*, 2019, vol. 59, no. 4, pp. 483–493.
5. Vinokurov S.F., Petrenko D.B., Sychkova V.A., Tarasova N.P. The distribution of rare earth elements in snow samples is a sensitive indicator of environmental pollution. *Doklady Earth Sciences*, 2014, vol. 456, no. 3, pp. 320–325.
6. Buchelnikov V.S., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Simonenkov D.V., Belan B.D., Tentyukov M.P. Analysis of the Content of Chemical Elements in Aerosols Using Data from Passive Sampling at Fono-vaya Observatory. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2020, vol. 33, no. 6, pp. 453–458.
7. Alekseeva M.N., Raputa V.F., Yaroslavtseva T.V., Yashchenko I.G. Estimation of air pollution due to gas glaring from remote observa-

- tions of flare thermal radiation. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2020, vol. 33, no. 3, pp. 289–284.
8. Evseeva N.S., Yazikov E.G., Kvasnikova Z.N., Batmanova A.S., Buchelnikov V.S. Modern aeolian morpholithogenesis: knowledge, regional manifestations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 96–107. In Rus.
 9. Pogrebnyak Yu.F., Tatyankina E.M., Tolochko V.V. Halos of dispersion of gold in the snow cover on the surface of the ore occurrence. *Doklady Earth Sciences*, 1979, vol. 245, no. 4, pp. 953–955.
 10. Taivalkoski A., Sarala P., Lukkari S., Sutherland D. Snow in mineral exploration – examples and practices in glaciated terrain. *Journal of Geochemical Explorations*, 2019, vol. 200, no. 5, pp. 1–12.
 11. Kristiansson K., Malmqvist L., Persson W. Geogas prospecting: a new tool in the search for concealed mineralizations. *Endeavour, New Series*, 1990, vol. 14, no. 1, pp. 28–35.
 12. Kristiansson K., Malmqvist L. Evidence for nondiffusive transport of ^{222}Rn in the ground and new physical model for the transport. *Geophysics*, 1982, vol. 47, no. 10, pp. 1444–1452.
 13. Kristiansson K., Malmqvist L. Trace elements in the geogas and their relation to bedrock composition. *Geoexploration*, 1987, vol. 24, pp. 517–534.
 14. Schumacher, D. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments. *Hydrocarbon Migration and its Nearsurface Expression. AAPG Memoir*. Eds. D. Schumacher, M.A. Abrams. 1996, vol. 66, pp. 71–89.
 15. Saunders D.F., Burson K.R., Thompson C.K. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations. *AAPG Bull.*, 1999, vol. 83, no. 1, pp. 170–185.
 16. Cameron E.M., Hamilton S.M., Leybourne M.I., Hall G.E.M., McClenaghan M.B. Finding deeply buried deposits using geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2004, vol. 4, pp. 7–32.
 17. Hamilton S.M., Cameron E.M., McClenaghan M.B., Hall G.E.M. Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden. Part I: methodologies and field investigation at the Marsh Zone gold property. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2004, vol. 4, pp. 33–44.
 18. *Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopayemye Zapadnoy Sibiri. T. 2. Geologicheskoe stroenie* [Geology and minerals of Western Siberia. Vol. 2. Mineral Resources]. Eds. A.V. Kanygin, V.G. Sviridov. Novosibirsk, SO RAN Publ., 1998. 254 p.
 19. Tentyukov M.P., Ignatiev G.V., Sobolev I.S., Gavrilov R.Yu. Physical properties of the snow cover and the mechanism of formation of geochemical barriers in the snow mass. *Bulletin of Geosciences*, 2022, no. 5 (329), pp. 26–37.
 20. Wang M., Gao Y., Liu Y. Progress in the collection of geogas in China. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2008, vol. 8, pp. 183–190.
 21. Dasch J.M., Wolff G. Trace inorganic species in precipitation and their potential use in source apportionment studies. *Water, Air and Soil Pollution*, 1989, vol. 43, pp. 401–412.
 22. Kowalczyk G.S., Gordon G.E., Rheingrover S.W. Identification of atmospheric particulate source in Washington, DC, using chemical elemental balances. *Environmental Science & Technology*, 1982, vol. 16, no. 2, pp. 79–90.
 23. Lindroos A., Derome J., Derome K., Niska K. Deposition. Forest condition monitoring in Finland (National report 1999). *The Finnish forest research institute, research papers 2000*, vol. 782, pp. 61–69.
 24. Pristova T.A., Vasilevich M.I. Chemical composition of snow cover in middle-taiga forest in Komi Republic. *Geochemistry International*, 2011, vol. 49, no. 2, pp. 199–206.

Received: 17 November 2022.

Reviewed: 2 December 2022.

Information about the authors

Roman Yu. Gavrilov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Igor S. Sobolev, Cand. Sc., chief geologist, Geo Service LLC.

Nadezhda P. Soboleva, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valeriy G. Voroshilov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Mikhail P. Tentyukov, Dr. Sc., professor, Pitirim Sorokin Syktyvkar State University.

УДК 691.54

КОМПЛЕКСНЫЕ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Копаница Наталья Олеговна¹,
kopanitsa@mail.ru

Демьяненко Ольга Викторовна¹,
demyanenko.olga.v@gmail.com

Куликова Анжелика Андреевна¹,
lika.panda.19@gmail.com

¹ Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

Актуальность исследований обусловлена важностью проблемы рационального использования природных ресурсов в производстве композиционных строительных материалов. Возможность заменить природное сырье: известняк, глину, песок, при производстве цементных вяжущих, бетонов и растворов отходами производства позволит существенно снизить нагрузку на сырьевую базу. Серьезную экологическую проблему для горнодобывающих предприятий составляет утилизация отходов камнедробления. Применение неорганических отходов различного химического состава позволяет направленно регулировать процессы структурообразования и твердения наполненных цементных систем и получать композиционные материалы с высокими показателями физико-механических свойств.

Цель: научно обосновать и исследовать возможность применения отходов горнодобывающих предприятий в качестве компонента для производства модифицирующих добавок в цементные системы.

Объекты: модифицированный цементный камень; модифицированные цементно-песчаные растворы.

Методы: определение подвижности смесей, прочности при изгибе и при сжатии по ГОСТ; термический анализ; электронная микроскопия.

Результаты. Представлены сравнительные результаты исследований по влиянию добавки микрокальцита разных месторождений на свойства цементных систем. Показано, что введение добавки микрокальцита (МСа) Дальнегорского горного карьера повышает прочность на сжатие цементного камня в первые сутки на 16 %, но на 3 и 7 суток прочность у модифицированных образцов снижается относительно контрольных образцов. Введение добавки МСа Ново-Ивановского карьера, вблизи г. Полевского, ООО «Эверест» в количестве 5 % от массы цемента существенно повышает предел прочности при сжатии цементного камня, способствует образованию дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция, стабильных высокоосновных гидроалюминатов кальция с разрозненной игольчатой структурой, затягивающей поры.

Ключевые слова:

Вяжущее, цементные композиции, микрокальцит, модифицирующие добавки, вторичные ресурсы.

Введение

Одним из главных направлений развития в области строительства является энерго- и ресурсосбережение, которое включает освоение и выпуск новых строительных материалов, получаемых по способствующим экономии ресурсов технологиям. Экономическое положение в стране предопределяет новый подход к выбору эффективных строительных материалов для жилищного строительства. В первую очередь на стоимость строительных материалов влияет резкое увеличение цен на энергоносители, минеральные и органические сырьевые материалы, а также высокая стоимость транспортных перевозок [1–4].

Снижение стоимости стройматериалов возможно путем сокращения расходов на энергоносители в разнообразных технологических процессах в производстве строительных материалов. Этого можно достигнуть применением комплексных химических модификаторов на основе отечественных добавок [5–14].

В ближайшем будущем производство сухих строительных смесей в России имеет благоприятные перспективы развития, так как постоянно возрастающий объем строительства прогнозирует повышение спроса

на данный вид строительных материалов, при этом замещение импортных аналогов конкурентоспособной отечественной продукцией является важным фактором увеличения емкости рынка [15].

В последние годы значительно возрастает интерес к использованию побочных продуктов и отходов промышленности в производстве строительных материалов, и этот путь является перспективным и актуальным, так как позволяет решать не только технико-экономические, но и острые экологические вопросы.

Производство цемента выделяет CO₂ в атмосферу как непосредственно при нагревании карбоната кальция с образованием извести и диоксида углерода, так и косвенно, за счет использования энергии, если его производство связано с выбросом CO₂. Цементная промышленность производит около 10 % глобальных антропогенных выбросов CO₂, из которых 60 % приходится на химический процесс, а 40 % – на сжигание топлива. Согласно проведенным исследованиям на 4 млрд т цемента, производимого ежегодно, приходится 8 % мировых выбросов CO₂.

На каждую тонну произведенного портландцемента выделяется около 900 кг CO₂. В Европейском союзе

удельное потребление энергии для производства цементного клинкера было снижено примерно на 30 % с 1970-х гг. Это сокращение потребностей в первичной энергии эквивалентно примерно 11 млн т угля в год с соответствующими преимуществами в сокращении выбросов CO₂. На его долю приходится примерно 5 % антропогенного CO₂.

Большая часть выбросов углекислого газа при производстве портландцемента (примерно 60 %) образуется в результате химического разложения карбоната кальция, входящего в состав минералов портландцементного клинкера. Эти выбросы могут быть уменьшены за счет снижения содержания клинкера в цементе, а также с помощью альтернативных методов производства цемента, таких как использование тонкодисперсных добавок на основе вторичного сырья промышленного производства и переработки горных пород: шлаков, зол, микрокремнезема, карбонатной муки. Присутствие в строительной смеси эффективных модифицирующих добавок может обеспечить снижение расхода цемента на 1 м³ растворной или бетонной смеси до 15–30 %.

Вместе с тем в состав многих добавок, разрабатываемых на основе вторичного сырья, входят химические соединения, традиционно не используемые в строительстве, механизмы, действия которых на процессы гидратации и твердения цементных и смешанных систем исследованы недостаточно. Поэтому для получения эффективных модифицирующих добавок с использованием вторичного сырья необходима разработка технологий их подготовки, переработки, а также исследования процессов гидратации, твердения цементных вяжущих, обеспечивающих формирование прочностных свойств и долговечности композиционных материалов. Анализ литературных источников, посвященных данным проблемам, показывает, что большое количество местного сырья и вторичных ресурсов различных отраслей промышленности в большинстве регионов страны используется недостаточно [2, 16–23].

Таким образом, исследования по возможности использования вторичного сырья различных отраслей промышленности в качестве сырьевой базы для получения модифицирующих добавок, наполнителей и вяжущих материалов на современном уровне развития производства становятся не только актуальными, но и жизненно необходимыми, поскольку позволяют комплексно решать проблему повышения эффективности и качества строительного производства и снизить экологический ущерб окружающей среде.

Исследования в данной работе проводились с целью изучения возможности применения тонкодисперсных компонентов микрокальцита Дальнегорского горного карьера и Ново-Ивановского карьера в качестве модифицирующих добавок в цементные системы.

Материалы и методы

Для проведения исследований использовались следующие материалы.

Вяжущее: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н Топкинского цементного завода. Характеристики вяжущего

удовлетворяют требованиям ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия».

Модифицирующие добавки:

- микрокальцит Дальнегорского горного карьера. Микрокальцит (МСа) является отходом производства при переработке мрамора. Содержание СаСО₃ – 92,7 %;
- микрокальцит, многотоннажный отход, образующийся при дроблении мрамора МК-5 по ТУ 5743-002-671431849-2015 на Ново-Ивановском карьере вблизи г. Полевского, ООО «Эверест».

Сравнительные характеристики исследуемых микрокальцитов по минералогическому составу и свойствам представлены в табл. 1.

Таблица 1. Минералогический состав и физические свойства микрокальцита

Table 1. Mineralogical composition and physical properties of microcalcite

Показатель/Index	Дальнегорский карьер Dalnegorsky quarry	Ново-Ивановский карьер Novo-Ivanovo quarry
СаСО ₃ , %	92,7	97–99
СаMg[CO ₃] ₂ , %	4,9	не более 0,3 no more than 0,3
SiO ₂ , %	0,4	не более 0,2 no more than 0,2
SO ₃ , %	0,080	–
FeS ₂ , %	0,2	не более 0,1 no more than 0,1
Полевые шпаты/Feldspars, %	1	–
Гидроокислы железа Iron hydroxides, %	0,3	
Глинистые/Clayey	0,5	
Массовая доля летучих веществ, % Mass fraction of volatile substances, %	–	не более 0,3 no more than 0,3
Массовая доля веществ растворимых в воде, % Mass fraction of substances soluble in water, %		
Плотность (ISO 787/10), кг/м ³ Density (ISO 787/10), kg/m ³	2620	2740
Удельная поверхность, м ² /г Specific surface area, m ² /g	0,2	0,25

Анализ данных табл. 1 показывает, что состав исследуемых тонкодисперсных вторичных продуктов представлен преимущественно СаСО₃, при этом более высокие значения содержания СаСО₃ (97–99 %) и величины удельной поверхности у микрокальцита Ново-Ивановского карьера, что может в большей степени влиять на свойства цементного камня.

Заполнитель: в качестве заполнителя использовался песок Виллинского месторождения Томского района с модулем крупности М_к=1,8, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ».

Для оценки влияния добавки микрокальцита различных месторождений на свойства цементного камня готовились образцы-кубики 20×20×20 мм из цементного теста нормальной густоты, которые хранились в условиях (Т=20 ±2 °С, W=90–100 %) и испытывались на прочность в 1, 3, 7, 28 сутки (ГОСТ 30744-2001).

Для изучения влияния добавок микрокальцита на свойства цементно-песчаного раствора формовались образцы-балочки 40×40×160 мм, контрольный и модифицированный, с маркой по подвижности Пк2 и Пк3. Содержание добавки принято 2,5 и 5 % от массы цемента. Образцы хранились в условиях (T=20 ±2 °C, W=90–100 %) и испытывались на изгиб и на сжатие в 1, 3, 7 и 28 сутки.

Обсуждение результатов

В работе исследовано влияние двух видов микрокальцита на свойства цементного камня. Составы 1–3 (табл. 2) готовились с добавкой микрокальцита Дальнегорского горного карьера. Составы 4–6 (табл. 2) с микрокальцитом Ново-Ивановского карьера. Содержание добавки варьировалось от 2,5 до 7,5 %. Полученные результаты по значениям нормальной плотности (водопотребности) цементного теста и прочности при сжатии сравнивались с контрольными образцами.

Анализ данных, представленных в табл. 2, показал, что с введением микрокальцита водопотребность цементного теста возрастает, по сравнению с контрольным образцом (от 1 до 5 %). В большей степени это происходит при введении добавки микрокальцита

Ново-Ивановского карьера, что может быть связано с его большей, чем у кальцита Дальнегорского горного карьера, величиной удельной поверхности.

Таблица 2. Составы исследуемых образцов и водопотребность цементного теста

Table 2. Compositions of the studied samples and water demand of cement paste

№ состава Composition no.	ПЦ Portland cement, %	МСа, %	Нормальная плотность Normal density, %
Контрольный Control	100	–	26,75
1	97,5	2,5	27
2	95	5	27,25
3	92,5	7,5	27,75
4	97,50	2,5	27,7
5	95,00	5,0	28,0
6	92,50	7,5	28,2

Результаты испытаний затвердевших образцов цементного камня на определение предела прочности при сжатии в различные сроки твердения представлены в табл. 3.

Таблица 3. Прочность при сжатии цементного камня

Table 3. Compressive strength of cement stone

№ состава/Composition no.	R _{сж} , МПа/MPa			
	сутки/day			
	1	3	7	28
Контрольный/Control	55,13	84,27	89,82	95,2
1	62,97 (+14,2 %)	38,5 (–54,3 %)	77,67 (–13,5 %)	97,08(+1,9 %)
2	49,36 (–10,5 %)	59,47 (–29,4 %)	68,84 (–23,4 %)	73,62(–22,6 %)
3	50,68 (–8 %)	48,97 (–41,9 %)	69,44 (–22,7 %)	72,51(–23,8 %)
4	63,84 (+15,8 %)	87,15 (+3,4 %)	95,36 (+6,2 %)	108,60 (+14,0 %)
5	67,45 (+22,3 %)	95,64 (+13,5 %)	103,11 (+14,8 %)	119,94 (+26,0 %)
6	69,45 (+25,9 %)	86,26 (+2,4 %)	96,16 (+7,0 %)	109,55 (+15,0 %)

Анализ результатов исследований (табл. 3) показал, что образцы цементного камня составов 1–3, несмотря на более низкую, чем у составов 4–6, водопотребность, показали существенное снижение предела прочности при сжатии, как в ранние, так и в поздние сроки твердения, что можно объяснить недостаточно высокой удельной поверхностью добавки микрокальцита Дальнегорского карьера для стимулирования гидратационных процессов твердения цементного камня. С введением микрокальцита Ново-Ивановского карьера (составы 4–6) с более высоким значением удельной поверхности предел прочности при сжатии увеличивается в 1 сутки от 15 до 25,9 %, на 28 суток до 26 %, по сравнению с контрольным составом во всем интервале значений вводимой добавки, достигая наибольшего эффекта при ее содержании 5 % (состав 5). Коэффициент вариации значений прочностных характеристик составляет не более 5 %.

Для установления влияния модифицирующей добавки микрокальцита на прочностные характеристики строительного раствора были проведены испытания цементно-песчаных образцов-балочек (40×40×160 мм) на изгиб и сжатие. Содержание добавки микрокаль-

цита принято 2,5 и 5 % от массы цемента. Для растворов смесей варьировалась марка по подвижности Пк2 и Пк3. Подвижность Пк2: в составах 1 и 2 применялся микрокальцит Дальнегорского карьера, в 3, 4 – Ново-Ивановского карьера. Подвижность Пк3: в составах 5 и 6 применялся микрокальцит Дальнегорского карьера, в 7 и 8 – Ново-Ивановского карьера. Составы и результаты испытаний растворов смесей приведены в табл. 4.

Затвердевшие образцы строительных растворов испытывались на изгиб и сжатие в 1, 3, 7 и 28 сутки.

Результаты исследований представлены на рис. 1–4.

Представленные на диаграммах (рис. 1, 2) результаты показали стабильный прирост прочности у составов 3 и 4 в начальные сроки твердения (1, 3, 7 сутки) – до 111 % при изгибе и до 200 % при сжатии. На 28 суток твердения состав 4, с содержанием добавки микрокальцита 5 % Ново-Ивановского карьера, показывает увеличение прочности на 28 % при изгибе и 29,5 % при сжатии, что также подтверждает эффективность этой добавки. У состава 2 прочность повышается лишь в 1 сутки, что позволяет предполагать, что микрокальцит Дальнегорского горного карьера в

количестве 5 % от массы цемента обладает свойствами ускорителя твердения.

Таблица 4. Составы исследуемых цементно-песчаных растворов и их характеристики

Table 4. Compositions of the studied cement-sand mortars and their characteristics

№ состава Composition no.	Цемент, г Cement, g	Песок, г Sand, g	МСа, %	В/Ц W/C	Осадка конуса, см, марка по подвижности Cone draft, cm, mobility mark	
Контр. 1 для Пк2 Control 1, for Pk2	1665	5000	–	0,69	5,0 Пк2	
1	1623		2,5	0,71	6,0 Пк2	
2	1582		5	0,73	6,0 Пк2	
3	1623		2,5	0,71	6,5 Пк2	
4	1582		5	0,73	6,5 Пк2	
Контр. 2 для Пк3 Control 2, for Pk3	1665		–	–	0,76	11,0 Пк3
5	1623		2,5	0,78	8,5 Пк3	
6	1582		5	0,80	10,0 Пк3	
7	1623	2,5	0,78	10,0 Пк3		
8	1582	5	0,80	11,5 Пк3		

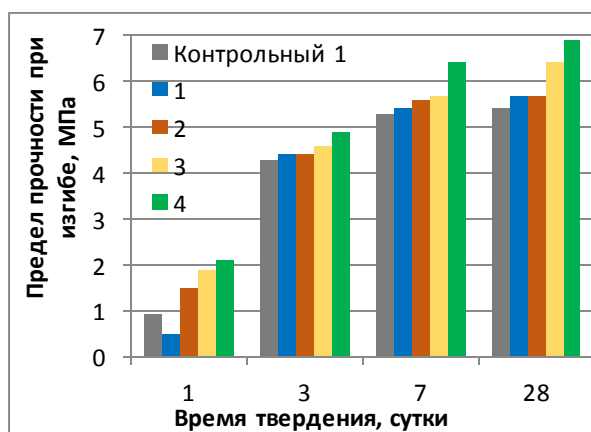


Рис. 1. Прочность при изгибе цементно-песчаных образцов с подвижностью Пк2

Fig. 1. Bending strength of cement-sand specimens with mobility Pk2

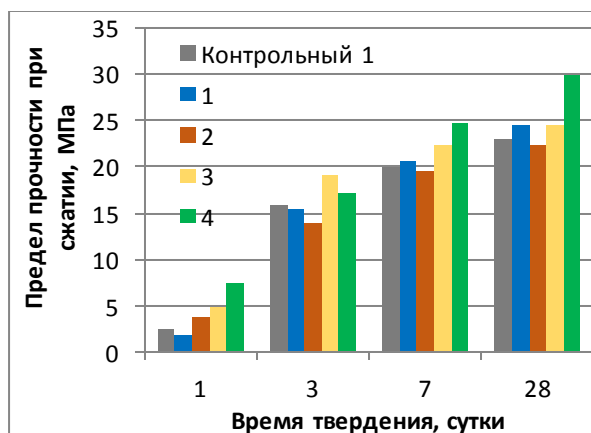


Рис. 2. Прочность при сжатии цементно-песчаных образцов с подвижностью Пк2

Fig. 2. Compressive strength of cement-sand samples with mobility Pk2

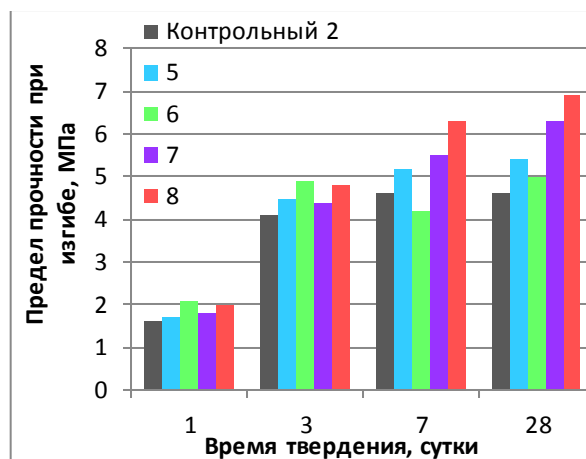


Рис. 3. Прочность при изгибе цементно-песчаных образцов с подвижностью Пк3

Fig. 3. Bending strength of cement-sand specimens with mobility Pk3

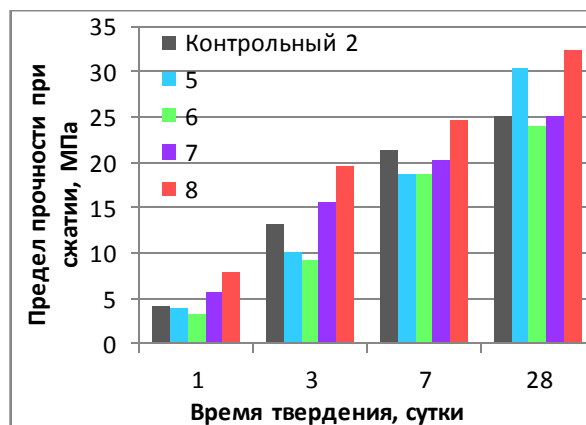


Рис. 4. Прочность при сжатии цементно-песчаных образцов с подвижностью Пк3

Fig. 4. Compressive strength of cement-sand samples with mobility Pk3

Анализ данных, представленных на рис. 3, 4, показал стабильный рост прочности на образцах состава 8 с содержанием добавки микрокальцита Ново-Ивановского карьера в количестве 5 % от массы цемента во всех сроках твердения. На 28 суток твердения прочность образцов состава 8 при сжатии увеличилась на 29 %, при изгибе – на 50 %, по сравнению с контрольным составом. Марка по подвижности не влияет на повышение эксплуатационных характеристик раствора. При изменении подвижности раствора у составов 5, 6, с микрокальцитом Дальнегорского горного карьера, прочность в ранние сроки ниже, чем у контрольного. Но к 28 суткам у состава 5 с добавкой микрокальцита 2,5 % наблюдается прирост прочности при изгибе на 17 %, при сжатии – на 21,5 %.

Плотность образцов цементного камня составляет для контрольного 2118 кг/м³ для модифицированного – 2138–2140 кг/м³. Значение средней плотности образцов цементного камня с добавкой микрокальцита увеличивается по сравнению с контрольными данными, что позволяет предполагать формирование более плотной структуры цементного камня и раствора

и объяснить увеличение их прочностных характеристик.

Полученные результаты определения прочностных характеристик цементного камня и цементно-песчаного раствора показали возможности использования микрокальцита Ново-Ивановского карьера в количестве 5 % от массы цемента как модифицирующую добавку, позволяющую повысить прочностные характеристики.

Добавка микрокальцита Дальнегорского горного карьера не показала такой же эффективности по кри-

терию прочности, что связано с меньшим значением его удельной поверхности и с более низким содержанием основного компонента – CaCO_3 . В перспективе возможны исследования влияния данной добавки на свойства цемента после механической активации (помол).

Для оценки возможных фазовых изменений, происходящих в цементной системе с микрокальцитом Ново-Ивановского карьера, в интервале температур от 20 до 1000 °С проведен термический анализ (рис. 5).

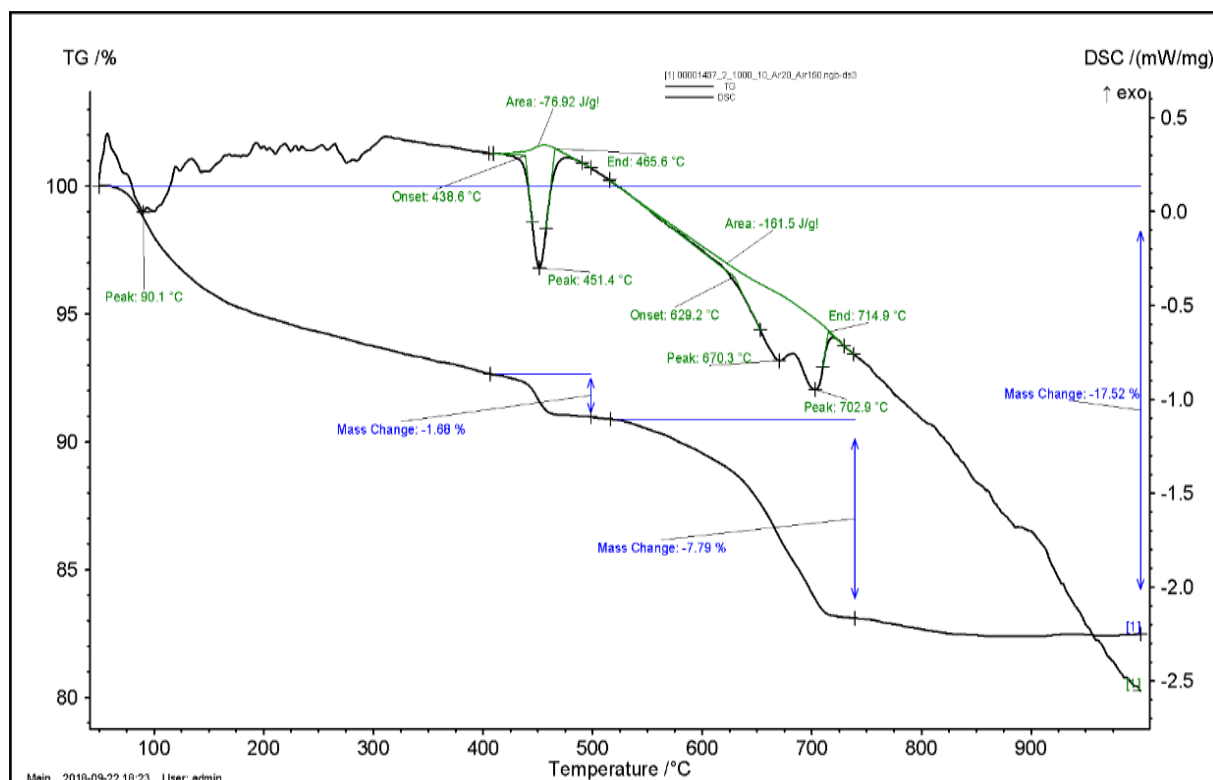


Рис. 5. Термограмма цементного камня с добавкой МСa
 Fig. 5. Thermogram of cement stone with the addition of MСa

Эндоэффект при 90 °С с потерей массы 8 % связан с удалением слабосвязанной воды. Эндоэффект при температуре 451 °С соответствует разложению $\text{Ca}(\text{OH})_2$. При 670 °С происходит дегидратация тоберморитоподобных гидросиликатов кальция, а при 702 °С возможно начало декарбонизации микрокальцита. Снижение температуры декарбонизации микрокальцита может быть связано с его высокой удельной поверхностью.

На рис. 6 представлены рентгенограммы исследуемых образцов. Сравнение рентгенограмм образцов цементного камня с добавкой микрокальцита и контрольного подтверждает возможность образования новых кристаллических фаз в цементном камне. С введением добавки микрокальцита в гидратированном цементе идентифицируются дополнительные пики низкоосновных гидросиликатов кальция, сходных по структуре с афвиллитом $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ ($d/n=1,924 \cdot 10^{-10\text{м}}$).

Кроме того, в модифицированном цементном камне появляются пики тоберморитоподобных соединений $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$ ($d/n=3,02;3,34;2,61 \cdot 10^{-10\text{м}}$), гидрокربосиликат кальция ($d/n=1,68 \cdot 10^{-10\text{м}}$), что, вероятно, и обеспечивает повышение прочности цементного камня. Интенсивность пиков $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в модифицированном цементном камне снизилась по сравнению с контрольным образцом.

Для подтверждения полученных результатов влияния добавки на формирование структуры цементного камня проведен электронно-микроскопический анализ образцов. Анализ данных на снимке (рис. 7, б) показывает, что введение добавки МСa в цементную матрицу обеспечивает образование низкоосновных гидросиликатов кальция, стабильных высокоосновных гидроалюминатов кальция с разрозненной игольчатой структурой, затягивающей поры, обеспечивает повышение плотности микроструктуры и увеличение центров кристаллизации.

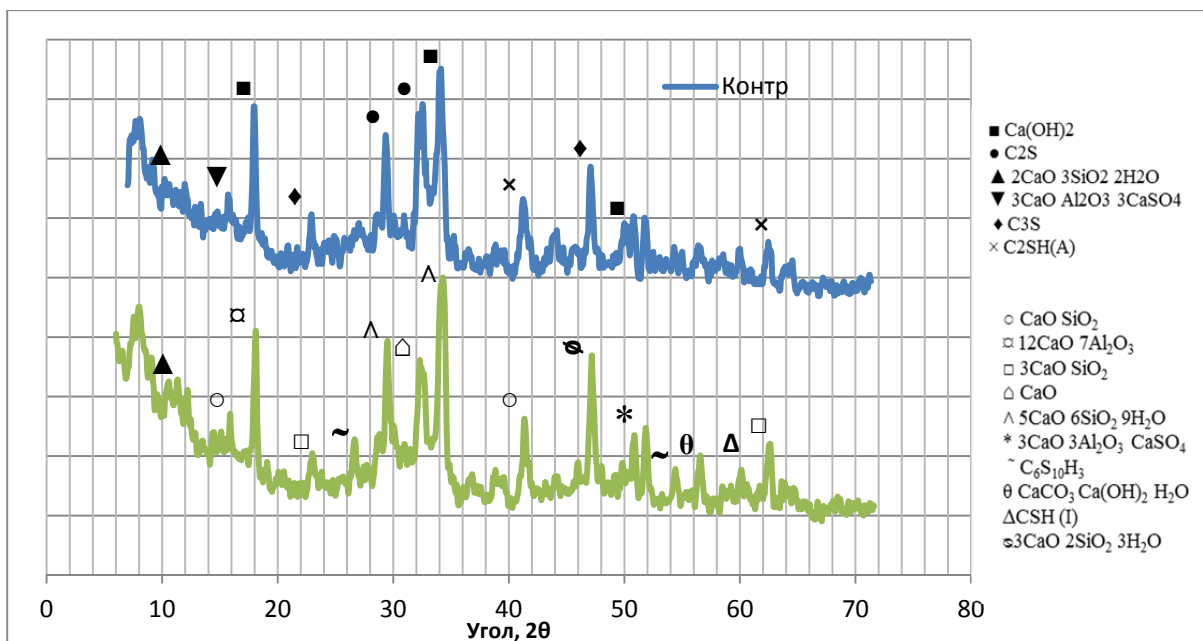
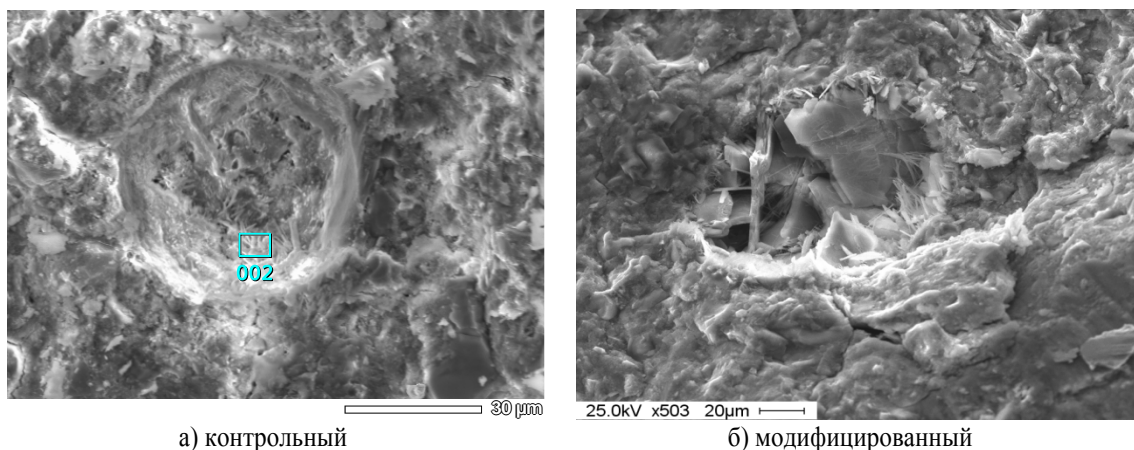


Рис. 6. Рентгенограмма цементного камня, модифицированного добавкой МСа 5 %

Fig. 6. Radiograph of cement stone modified with the addition of MСa 5 %



а) контрольный

б) модифицированный

Рис. 7. Электронно-микроскопический снимок цементного камня, модифицированного добавкой микрокальцита

Fig. 7. Electron microscopic image of cement stone modified with the addition of microcalcite

Заключение

Полученные результаты исследований позволили установить возможность рационального использования карбонатных отходов (микрокальцита) горнодобывающих предприятий как эффективную добавку в цементные композиции, что позволит существенно снизить нагрузку на сырьевую базу и внести вклад в решение экологических проблем. Представленные сравнительные результаты исследований по влиянию добавки микрокальцита из разных месторождений на свойства цементных систем показывают, что введение добавки микрокальцита (МСa) при ее оптимальном значении обеспечивает существенное повышение

предела прочности при изгибе и сжатии цементного камня и строительного раствора. Эффективность влияния добавки микрокальцита на свойства цементных композиций зависит от его минералогического состава и величины удельной поверхности. Введение добавки микрокальцита способствует появлению дополнительных центров кристаллизации при твердении цементного теста, образованию дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция, уплотняет структуру цементного камня и раствора.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саркисов Ю.С., Асосков Ю.Ф. О некоторых путях энерго- и ресурсосбережения в производстве бетонных изделий // Вестник ТГАСУ. – 2010. – № 3. – С. 166–174.

2. Ильина Л.В., Сидоркович Ю.В. Влияние модифицирующих добавок на свойства сухих строительных смесей // Строительство и архитектура. – 2018. – № 10. – С. 87–91.

3. Порошковые бетоны с применением техногенного сырья / А.Д. Толстой, В.С. Лесовик, Л.Х. Загороднюк, И.А. Ковалева // Вестник МГСУ. – 2015. – № 11. – С. 101–109.
4. Саркисов Ю.С., Горленко Н.П. Этическая приемлемость возможности применения на практике строительных материалов и технологий // Инвестиции, градостроительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения: Материалы XI Международной научно-практической конференции. В 2-х ч. / под ред. Т.Ю. Овсянниковой, И.Р. Салагор. – Томск, 2021. – С. 618–624.
5. Дорогобид Д.Н., Букин И.В. Применение комплексных модифицирующих добавок и их влияние на энергосбережение при производстве строительных материалов и изделий // Омский научный вестник. – 2010. – № 3. – С. 304–307.
6. Ткач Е.В., Темирканов Р.И., Ткач С.А. Комплексное исследование модифицированного бетона на основе активированного микрокремнезема совместно с микроармирующим волокном для повышения эксплуатационных характеристик // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 5. – С. 215–226.
7. Управление технологическими процессами производства модифицированных бетонов / А.И. Кудяков, В.А. Кудяков, С.А. Лукьянчиков, К.Л. Кудяков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 6. – С. 116–126.
8. Oshio A., Sone T., Matsui A. Properties of concrete containing mineral powders // Cement Association of Japan Review. – 1987. – P. 114–117.
9. Wakizaka Y., Morya S., Kawano H. Relationship between mineral assemblages of rocks and their alkali reactivities // Cement Association of Japan Review. – 1987. – P. 292–295.
10. Scrivener K.L., Kirkpatrick R.J. Innovation in use and research on cementitious material // Cem. Concr. Res. – 2008. – № 38 (2). – P. 128–136.
11. Leblanc J.L. Filled polymers: science and industrial applications. – New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. – 428 p.
12. Particulate-filled polymer composites. 2nd ed. / Ed. by R. Rother. – New York: Kovel, Rapra Technology Limited, 2008. – 560 p.
13. Alam M.A., Sherif E.-S.M., Al-Zahrani S.M. Fabrication of various epoxy coatings for offshore applications and evaluating their mechanical properties and corrosion behavior // International Journal of Electrochemical Science. – 2013. – V. 8. – № 3. – P. 3121–3131.
14. Neilsen L. Mechanical properties of polymers and composites. – NY: Marcel Dekker, inc., 1974. – 556 p.
15. Загороднюк Л.Х., Гридчин А.М., Лесовик В.С. Тенденции развития производства сухих строительных смесей в России // Строительство и архитектура. – 2016. – № 12. – С. 6–14.
16. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A. Effective polyfunctional additive for composite materials based on cement // Digital Technologies in Construction Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering / ed. by S.V. Klyuev. – 2022. – V. 173. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8_17 (дата обращения: 15.09.2022).
17. Комплексные модифицирующие добавки для строительных смесей на цементной основе / А.А. Куликова, О.В. Демьяненко, Е.А. Сорокина, Н.О. Копаница // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – Т. 21. – № 6. – С. 140–148. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-140-148
18. Демьяненко О.В., Куликова А.А., Копаница Н.О. Оценка влияния комплексной полифункциональной добавки на эксплуатационные характеристики цементного камня и бетона // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2020. – Т. 22. – № 5. – С. 139–152. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-139-152
19. Влияние комплексных модифицирующих добавок на эксплуатационные свойства тяжелого бетона / О.В. Демьяненко, А.А. Куликова, Н.О. Копаница, А.Г. Петров // Известия вузов. Строительство. – 2021. – № 5. – С. 23–32 DOI: 10.32683/0536-1052-2021-749-5-23-32
20. Тараканов О.В. Сухие строительные смеси с использованием местных сырьевых материалов // Доклады конференции BALTIMIX 2005. – 2005. URL: http://www.baltimix.ru/confer/confer_archive/reports/do-clad05/kronadug_tarajanov.php (дата обращения: 15.09.2022).
21. Myhre V. Microsilica in refractory castables. How does microsilica quality influence performance // UNITECR'05: 9th Biennial Worldwide congress on refractories. – Orlando, Florida, USA, 2005. – P. 191–195.
22. Kjellsen K.O., Lagerblad B. Influence of natural minerals in the filler fraction on hydration and properties of mortars. – Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1995. – 41 p.
23. Filled epoxy composites based on polyfraction microcalcite / T.A. Nizina, J.A. Sokolova, A.N. Chernov, D.R. Nizin, A.I. Popova, N.S. Kanaeva // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – V. 83 (7). – P. 83–91. DOI: 10.18720/MCE.83.8.

Поступила: 17.10.2022 г.

Дата рецензирования: 15.11.2022 г.

Информация об авторах

Копаница Н.О., доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Демьяненко О.В., старший преподаватель кафедры строительных материалов и технологий Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Куликова А.А., аспирант кафедры строительных материалов и технологий Томского государственного архитектурно-строительного университета.

UDC 691.54

COMPLEX ADDITIVES BASED ON SECONDARY RESOURCES FOR MODIFICATION OF CEMENT COMPOSITES

Natalya O. Kopanitsa¹,
kopanitsa@mail.ru

Olga V. Demyanenko¹,
demyanenko.olga.v@gmail.com

Anzhelika A. Kulikova¹,
lika.panda.19@gmail.com

¹ Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya square, Tomsk, 634003, Russia

The relevance of the research is caused by the importance of the problem of rational use of natural resources in the production of composite building materials. The ability to replace natural raw materials: limestone, clay, sand in the production of cement binders, concretes and mortars with production waste will significantly reduce the load on the raw material base. A serious environmental problem for mining enterprises is the disposal of stone crushing waste. The use of inorganic wastes of various chemical composition makes it possible to control the processes of structure formation and hardening of filled cement systems and to obtain composite materials with high physical and mechanical properties.

The main aim is to scientifically substantiate and explore the possibility of using waste from mining enterprises as a component for the production of modifying additives in cement systems.

Objects: modified cement stone; modified cement-sand mortars.

Methods: determination of the mobility of mixtures, flexural and compressive strength according to SS; thermal analysis; electron microscopy.

Results. The paper introduces the results of studies on the effect of adding microcalcite from different deposits on the properties of cement systems. It is shown that the addition of microcalcite (MCA) additive from the Dalnegorsk mining quarry increases the compressive strength of cement stone on the first day by 16 %, but on days 3 and 7, the strength of the modified samples decreases relative to the control samples. The introduction of the MCA additive of the Novo-Ivanovsky quarry, near the town of Polevskoy, Everest LLC in the amount of 5 wt. % of cement significantly increases the compressive strength of the cement stone, promotes the formation of an additional amount of low-basic calcium hydrosilicates, stable high-basic calcium hydroaluminates with an overgrown needle-like structure, tightening pores.

Key words:

Binder, cement compositions, microcalcite, modifying additives, secondary resources.

The research was supported by the State task of the Ministry of Science and Higher Education RF FEMN-2022-0001.

REFERENCES

- Sarkisov Yu.S. On some ways of energy and resource saving in the production of concrete products. *Vestnik TGASU*, 2010, no. 3. pp. 166–174.
- Ilina L.V., Sidorkovich Yu.V. Influence of modifying additives on the properties of dry building mixtures. *Stroitelstvo i arkhitektura*, 2018, no. 10, pp. 87–91. In Rus.
- Tolstoj A.D., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Kovaleva I.A. Powder concretes using technogenic raw materials. *Vestnik MGSU*, 2015, no. 11, pp. 101–109. In Rus.
- Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P. Eticheskaya priemlest vozmozhnosti primeneniya na praktike stroitelnykh materialov i tekhnologii [Ethical acceptability of the possibility of practical application of building materials and technologies]. *Investitscii, gradostroitelstvo, nedvizhimost kak drayvery sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya territorii i povysheniya kachestva zhizni naseleniya. Materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Investments, urban planning, real estate as drivers of the socio-economic development of the territory and improving the quality of life of the population. Materials of the XI International Scientific and Practical Conference]. Tomsk, 2021. pp. 618–624.
- Dorogobid D.N., Bukin I.V. The use of complex modifying additives and their impact on energy saving in the production of building materials and products. *Omskiy nauchny vestnik*, 2010, no. 3, pp. 304–307. In Rus.
- Tkach E.V., Temirkhanov R.I., Tkach S.A. Comprehensive study of modified concrete based on activated microsilica together with micro-reinforcing fiber to improve performance. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 5, pp. 215–226. In Rus.
- Kudyakov A.I., Kudyakov V.A., Lukyanchikov S.A., Kudyakov K.L. Control of technological processes for the production of modified concrete. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2017, no. 6, pp. 116–126. In Rus.
- Oshio A., Sone T., Matsui A. Properties of concrete containing mineral powders. *Cement Association of Japan Review*, 1987, pp. 114–117.
- Wakizaka Y., Morya S., Kawano H. Relationship between mineral assemblages of rocks and their alkali reactivities. *Cement Association of Japan Review*, 1987, pp. 292–295.
- Scrivener K.L., Kirkpatrick R.J. Innovation in use and research on cementitious material. *Cem. Concr. Res*, 2008, no. 38 (2), pp. 128–136.
- Leblanc J.L. *Filled polymers: science and industrial applications*. New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 428 p.
- Particulate-filled polymer composites*. 2nd ed. Ed. by R. Roth. New York, Knovel, Rapra Technology Limited, 2008. 560 p.
- Alam M.A., Sherif E.-S.M., Al-Zahrani S.M. Fabrication of various epoxy coatings for offshore applications and evaluating their mechanical properties and corrosion behavior. *International Journal of Electrochemical Science*, 2013, vol. 8, no. 3, pp. 3121–3131.
- Neilsen L. *Mechanical properties of polymers and composites*. NY, Marcel Dekker, inc., 1974. 556 p.
- Zagorodnyuk L.Kh., Gridchin A.M., Lesovik V.S. Trends in the development of the production of dry building mixtures in Russia. *Stroitelstvo i arkhitektura*, 2016, no. 12, pp. 6–14. In Rus.

16. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A. Effective polyfunctional additive for composite materials based on cement. *Digital Technologies in Construction Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering*. Ed. by S.V. Klyuev. 2022, vol. 173. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8_17 (accessed: 15 September 2022).
17. Kulikova A.A., Demyanenko O.V., Sorokina E.A., Kopanitsa N.O. Complex modifying additives for building mixtures based on cement. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2019, vol. 21, no. 6, pp. 140–148. In Rus. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-140-148.
18. Demyanenko O.V., Kulikova A.A., Kopanitsa N.O. Evaluation of the influence of a complex multifunctional additive on the performance characteristics of cement stone and concrete. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2020, vol. 22, no. 5, pp. 139–152. In Rus. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-139-152
19. Demyanenko O.V., Kulikova A.A., Kopanitsa N.O., Petrov A.G. Influence of complex modifying additives on the operational properties of heavy concrete. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*, 2021, no. 5, pp. 23–32. In Rus. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-749-5-23-32
20. Tarakanov O.V. Sukhie stroitelnye smesi s ispolzovaniem mestnykh syr'evykh materialov [Dry building mixes with the use of local raw materials]. *Reports of the BALTIMIX conference 2005*. 2005. Available at: http://www.baltimix.ru/confer/confer_archive/reports/do clad05/kronadug_tarajanov.php (accessed 15 September 2022).
21. Myhre B. Microsilica in refractory castables. How does microsilica quality influence performance. *UNITECR'05: 9th Biennial Worldwide congress on refractories*. Orlando, Florida, USA, 2005. pp. 191–195.
22. Kjellsen K.O., Lagerblad B. *Influence of natural minerals in the filler fraction on hydration and properties of mortars*. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1995. 41 p.
23. Nizina T.A., Sokolova J.A., Chernov A.N., Nizin D.R., Popova A.I., Kanaeva N.S. Filled epoxy composites based on polyfraction microcalcite. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, vol. 83 (7), pp. 83–91. DOI: 10.18720/MCE.83.8.

Received: 17 October 2022.

Reviewed: 15 November 2022.

Information about the authors

Natalya O. Kopanitsa, Dr. Sc., professor, Tomsk State University of Architecture and Building.

Olga V. Demyanenko, senior lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building.

Anzhelika A. Kulikova, post-graduate student, Tomsk State University of Architecture and Building.

УДК 552.55

МИНЕРАЛОГО-ХИМИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОПОКОВИДНЫХ ОПАЛ-КРИСТОБАЛИТОВЫХ ПОРОД КАК СЫРЬЯ ДЛЯ СТРОЙИНДУСТРИИ

Котляр Владимир Дмитриевич¹,
diatomit_kvd@mail.ru

Терёхина Юлия Викторовна¹,
yuliya-2209@mail.ru

¹ Донской государственный технический университет,
Россия, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью освоения и вовлечения опокovidных опал-кристобалитовых пород и их переходных разновидностей в производство строительных материалов различного назначения в регионах распространения данных пород – центральные районы России, Поволжье, Западная Сибирь, Северный Кавказ.

Цель: разработать критерии и методики оценки опокovidных опал-кристобалитовых пород при геологических работах для определения наиболее перспективных направлений их использования в производстве строительных материалов.

Объекты: разведанные месторождения и крупные проявления опокovidных опал-кристобалитовых пород, которые при геологических работах были оценены узконаправленно и в настоящее время не разрабатываются или не используются в производстве строительных материалов и изделий.

Методы: методики определения физико-механических свойств горных пород; методика количественного химического анализа горных пород, рентгенофазовые исследования, электронно-зондовые исследования, обеспечивающие возможность проведения элементного анализа в диапазоне от Na до U; методики проведения технологических испытаний по соответствующим технологиям производства строительных материалов и изделий. Расшифровка дифрактограмм проводилась с использованием соответствующих методик путем сопоставления с подобными исследованиями, а также с использованием международных баз данных.

Результаты. Разработана классификация опокovidных опал-кристобалитовых пород по химическому и минеральному составу как сырья для получения различных видов строительных материалов. Выделено четыре основных классификационных критерия: содержание кремнезёма в виде опала, содержание кремнезёма в виде кварца, содержание оксида алюминия и оксида кальция. Выделено шесть видов опокovidных опал-кристобалитовых пород: опоки кремнезёмные, опоки классические, опоки песчанистые, опоки глинистые, опоки карбонатные и опоки глинисто-карбонатные. Разработанная классификация позволяет на основе данных по химико-минералогическому составу опокovidных опал-кристобалитовых пород дать конкретные рекомендации по их использованию для производства определённых видов строительных материалов и прогнозировать их свойства.

Ключевые слова:

опока, опокovidные опал-кристобалитовые породы, строительные материалы, химический состав, минеральный состав, опал, опал-кристобалит, исследование, методика, классификация.

Введение

Опокovidные опал-кристобалитовые породы представлены обширными запасами в Центральном, Приволжском, Сибирском, Южном и Северо-Кавказском округах России. Характерной их особенностью, в отличие от других осадочных пород, является наличие аморфного кремнезёма в виде опала или опал-кристобалита и микропористая структура [1–5]. От диатомитов и трепелов опоки отличаются более плотной структурой, повышенной прочностью, а также тем, что они не размокают в воде в естественном виде. Для получения на основе опок пластичной массы их необходимо тонко измельчить (менее 1 мм) или механически активировать.

Опокovidные породы – это обширная группа пород с весьма разнообразным составом. Если говорить о «классических» опоках, которые содержат в своём составе небольшое количество глинистых и терригенных минералов, то они являются породами с максимальным содержанием опалового кремнезёма, от которых наблюдаются постепенные переходы: к глинистым породам – через глинистые опоки; к карбонатным породам – через карбонатные опоки; к песчанникам – через песчанистые опоки, содержащие в сво-

ём составе повышенное количество кварца алевритово-псаммитовой размерности. Поэтому, имея в виду камневидные микропористые неразмокаемые в воде породы, содержащие в своём составе опаловый кремнезём в том или ином количестве, правильно говорить опокovidные породы с соответствующим прилагательным (глинистые, карбонатные, песчанистые), а под «классическими», «нормальными», «чистыми» опоками следует понимать породы, состоящие из опалового кремнезёма с небольшим количеством глинистых минералов (до 20 %) и терригенных минералов (до 15 %).

Направления использования опокovidных пород, как и диатомитов и трепелов, довольно разнообразны, и каждая отрасль промышленности предъявляет свои требования к качественным характеристикам сырья (рис. 1).

Производство строительных материалов и изделий является одним из наиболее ёмких, экономически выгодных и значимых для промышленности и развития страны направлений в стройиндустрии. Отечественный и зарубежный опыт, а также наши работы в этом направлении с учётом анализа текущего состояния промышленности строительных материалов в России

позволили выделить наиболее перспективные направления использования опоквидных пород для производства строительных материалов, представленные на рис. 2 [6–12]. Прежде всего, это производство различных видов вяжущих веществ, производство широкой номенклатуры изделий строительной керамики, а также различных видов заполнителей для бетонов, сухих строительных смесей и добавок.

Однако, перед тем, как быть вовлеченной в различные виды промышленности, каждая сырьевая база, в т. ч. и опоквидные опал-кristобалитовые породы, проходит несколько стадий геологической и научной изученности, а также промышленную апробацию.

В современных экономических реалиях вышеперечисленные этапы проводятся точно, за счет частного капитала и представителей бизнеса, заинтересованных в расширении сырьевой базы для производства конкретной продукции в условиях либо действующих предприятий, либо проектируемых, с четкими требованиями к показателям качества исходного сырья.

На самой первой стадии – геологического изучения проявлений и перспективных участков опоквидных опал-кristобалитовых пород – важным моментом является выбор показателей качества породы и методик их оценки с целью установления пригодности сырья для дальнейшего использования.

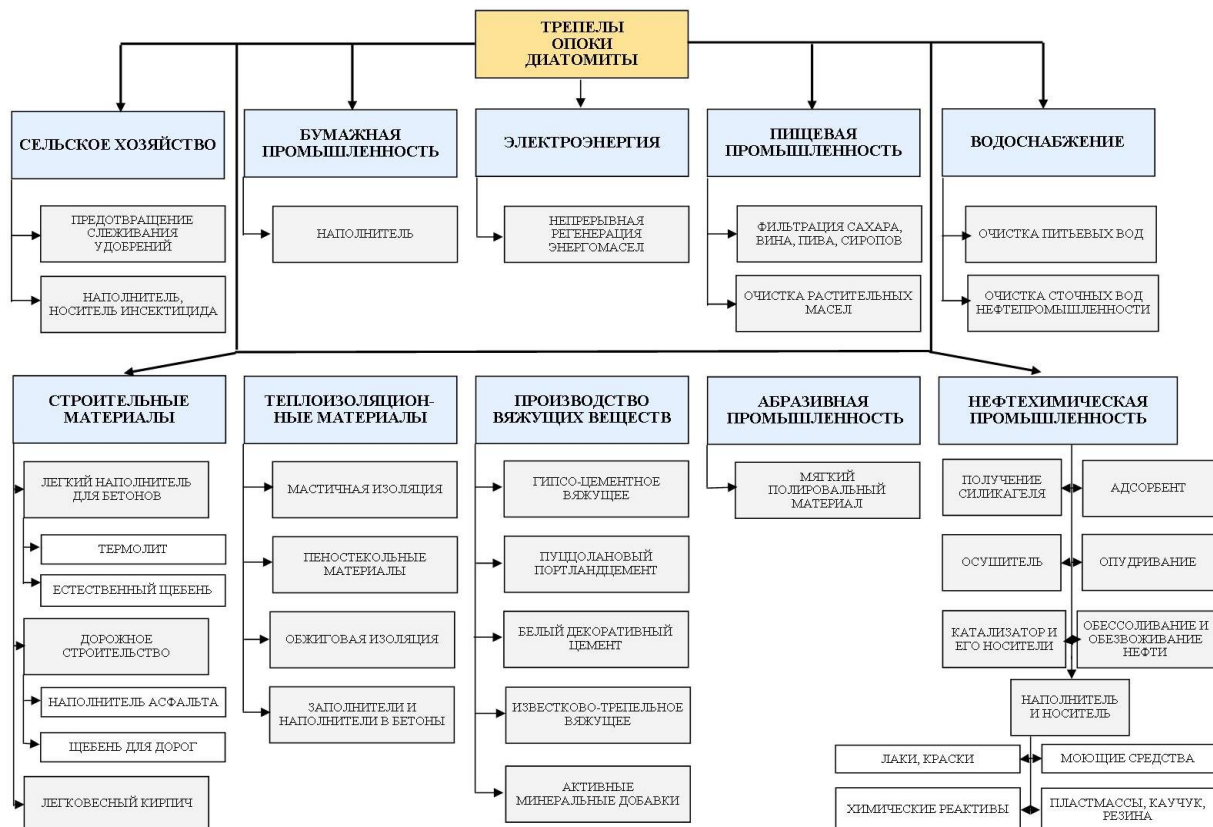


Рис. 1. Основные направления использования опал-кristобалитовых пород

Fig. 1. Main directions of using opal-cristobalite rocks



Рис. 2. Перспективные направления использования опоквидных опал-кristобалитовых пород в производстве строительных материалов

Fig. 2. Promising directions for the use of opokamorphic opal-cristobalite rocks in the production of building materials

Основным документом, которым руководствуются геологи при оценке опал-кristобалитовых пород, являются «Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Кремниевые породы» [4]. Данный рекомендательный документ прописывает четкие критерии по классификации месторождений кремнистых опал-кristобалитовых пород, но даёт лишь в общем виде рекомендации по их оценке и применению. Это закономерно, так как оценить и провести исследования на пригодность данного сырья для всех направлений использования, представленных на рис. 1, является слишком трудоёмкой задачей с учётом того, что каждая отрасль предъявляет свои специфические требования к сырью.

Особенностью законодательства РФ в вопросах недропользования по состоянию на 2022 г. при выдаче лицензий на изучение и разработку нерудных полезных ископаемых является то, что к подсчёту запасов в обязательном порядке необходимо принимать и вскрышные породы, которые также должны находить свое применение. Опоквидные опал-кristобалитовые породы часто находятся в ассоциации с известняками, глинами, песками, песчаниками и другими породами, при изучении, разведке и добыче которых опоквидные породы являются внешней или внутренней вскрышей, и у геологов возникает проблема по нахождению области их применения. При этом надо иметь в виду, что основной целью ранее проведенных геологических работ являлся поиск и разведка «чистых» опок, диатомитов и трепелов. Переходные разновидности, глинистые, карбонатные и песчаные опоки, которые имеют в природе гораздо более широкое распространение, оставались без внимания и просто характеризовались как горная масса. Между тем, переходные разновидности весьма ценны и имеют широкие перспективы для использования как в строительстве, так и в

различных областях промышленности, представленные на рис. 1. Уже на стадии геологического изучения месторождений чистых и переходных разновидностей опоквидных опал-кristобалитовых пород необходимы четкие критерии для определения наиболее перспективных направлений их использования.

Свойства и показатели качества горной породы, как известно, определяются её химико-минеральным составом и структурно-текстурными особенностями, изучение данных показателей является обязательным при геологических работах для рядовых и лабораторно-технологических проб. На основании наших многочисленных исследований, анализа работ ученых, занимающихся изучением опоквидных пород, нами предлагается классификация опоквидных пород по химическому, минеральному составу и структурным характеристикам применительно к использованию в стройиндустрии как наиболее материалоемкой отрасли, не имеющей географических ограничений.

Материалы и методы исследования

Пробы опоквидных опал-кristобалитовых пород для проведения исследования отбирались непосредственно авторами статьи на известных месторождениях и крупных проявлениях юга и центральной части России, Урала, Поволжья и Западной Сибири.

Основные методы исследования, приборы и оборудование, применяемые в данной работе, представлены на схеме исследований (рис. 3). Приборы и испытательное оборудование поверены и аттестованы в установленном порядке.

Расшифровка дифрактограмм проводилась с использованием соответствующих методик, путем сопоставления с подобными исследованиями, а также с использованием международных баз данных. Интерпретация полученных результатов выполнялась с использованием соответствующих методик.



Рис. 3. Методы исследования опоквидных опал-кristобалитовых пород
 Fig. 3. Methods for studying opokamorphic opal-cristobalite rocks

Результаты и их обсуждение

Изучение химического состава опоквидных пород показало, что они обладают достаточно разнообразным химическим составом. Принципиальных различий в химическом составе между ними и кислым

глинистым сырьём, к которому в основном относятся различные виды суглинков, нет (табл. 1). Также химический состав опоквидных пород близок к кислым магматическим породам – гранитоидам.

Таблица 1. Усреднённый химический состав опоквидных пород и суглинков, масс. %

Table 1. Average chemical composition of opokamorphic rocks and loams, wt. %

Породы Rocks	ППП loss on ignition	SiO ₂ общ./опал. total/opal	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃ общ./total	K ₂ O	Na ₂ O
Опоквидные породы Opokamorphic rocks	2–22	51–85/ 20–70	4–15	1–6	0,5–25,0	0,1–3,0	0,1–1,0	0,5–3,0	0,1–2,0
Суглинки/Loams	4–18	50–75	6–16	1–9	1–24	0,1–3	0,1–2	1–4	0,5–3,5

Химический состав тесно связан с минеральным составом. Увеличение или уменьшение содержания SiO₂ говорит об увеличении или уменьшении содержания опалового кремнезёма или кремнезёма в виде кварца. Увеличение содержания кварца всегда сопровождается увеличением средней плотности породы (плотность с учётом пор), и такие опоки называют песчанистыми. К сожалению, определить количество кремнезёма в виде кварца в опоквидных породах по методике оценки глинистого сырья по ГОСТ 21216-2014 «Сырье глинистое. Методы испытаний», п. 5.8 «Определение кварца – свободного диоксида кремния» достаточно затруднительно, так как «метод основан на выделении нерастворимого диоксида кремния с использованием горячей ортофосфорной кислоты и последующем прокаливании его до постоянной массы» [13], и в этом случае не растворяется в ортофосфорной кислоте опаловый кремнезём. Данный метод должен дополняться определением опалового кремнезёма по ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний», п. 4.22 «Определение реакционной способности горной породы и щебня (гравия)» [14]. Метод основан на растворении опалового кремнезёма в щелочах, и в частности в гидроксиде натрия.

Содержание оксида алюминия, а также оксидов калия и натрия говорит о присутствии глинистых минералов, и прежде всего гидрослюд. Содержание оксида алюминия в гидрослюдах составляет около 35 %, содержание оксида калия – около 10 %. Присутствие оксида натрия говорит о присутствии минералов из группы монтмориллонита или, что встречается гораздо чаще, смешанослойных минералов.

Содержание оксида кальция, как и магния, в количестве 1–2 % обусловлено его вхождением в состав некоторых глинистых минералов, увеличение больше этого количества говорит о наличии в составе опоквидных пород кальцита, который обычно присутствует в виде тонкодисперсных зёрен – менее 0,1 мм. Увеличение содержания кальцита говорит о переходе к карбонатным опокам и далее к известнякам. В карбонатных опоках содержание кальцита может достигать 40 %.

Оксиды железа в небольшом количестве входят в состав глинистых минералов, но в основном в опоквидных породах наблюдаются в виде гидроксидов и, в меньшей мере, оксидов. Оксиды серы говорят о

присутствии гипса и в меньшей мере сульфидов железа. Оксиды фосфора, титана, марганца входят в состав опоквидных пород в небольшом количестве и не оказывают особого влияния на технологические свойства и свойства получаемых изделий. Основными оксидами, по которым можно судить о конкретной опоквидной породе, являются: оксид кремния, разделённый на кварцевый и опаловый кремнезём, оксид алюминия и оксид кальция. В табл. 2 приведена условная укрупнённая классификация опоквидных пород, исходя из содержания вышеуказанных компонентов.

Таблица 2. Укрупнённая классификация опоквидных пород по химическому составу

Table 2. Enlarged classification of opokamorphic rocks by chemical composition

Группа Group	Тип опоквидных пород Facies of opokamorphic rocks	Содержание компонентов, масс. % Content of components, wt. %			
		Опаловый Opal SiO ₂	Кварцевый Silica SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
1	Окремнелые Silicified	80–90	0,1–10	2–5	0,1–3
2	Классические Classical	60–80	10–20	5–10	0,1–3
3	Песчанистые/Sandy	30–60	20–40	2–10	0,1–3
4	Глинистые/Clay	30–60	0,1–20	10–15	0,1–3
5	Карбонатные Carbonate	40–80	0,1–20	2–10	3–30
6	Глинисто-карбонатные Clay-carbonate	30–60	0,1–10	10–15	3–20

Нижняя граница содержания кварцевого кремнезёма и оксида кальция в данной классификации принята в количестве 0,1 %, так как данные оксиды всегда присутствуют в опоквидных породах в большем количестве. Содержание оксида алюминия в количестве более 15 % говорит о переходе глинистой опоки к опоквидным глинам, которые помимо других отличительных признаков характеризуются размокаемостью в воде. Содержание оксида кальция в количестве более 30 % говорит о переходе опоки к опоквидным (кремнистым) известнякам. Часто в природе встречаются смешанные породы – опоки глинисто-карбонатные. При преобладании глинистого компонента такие породы классифицируются как глины, при преобладании карбонатного компонента – как известняки.

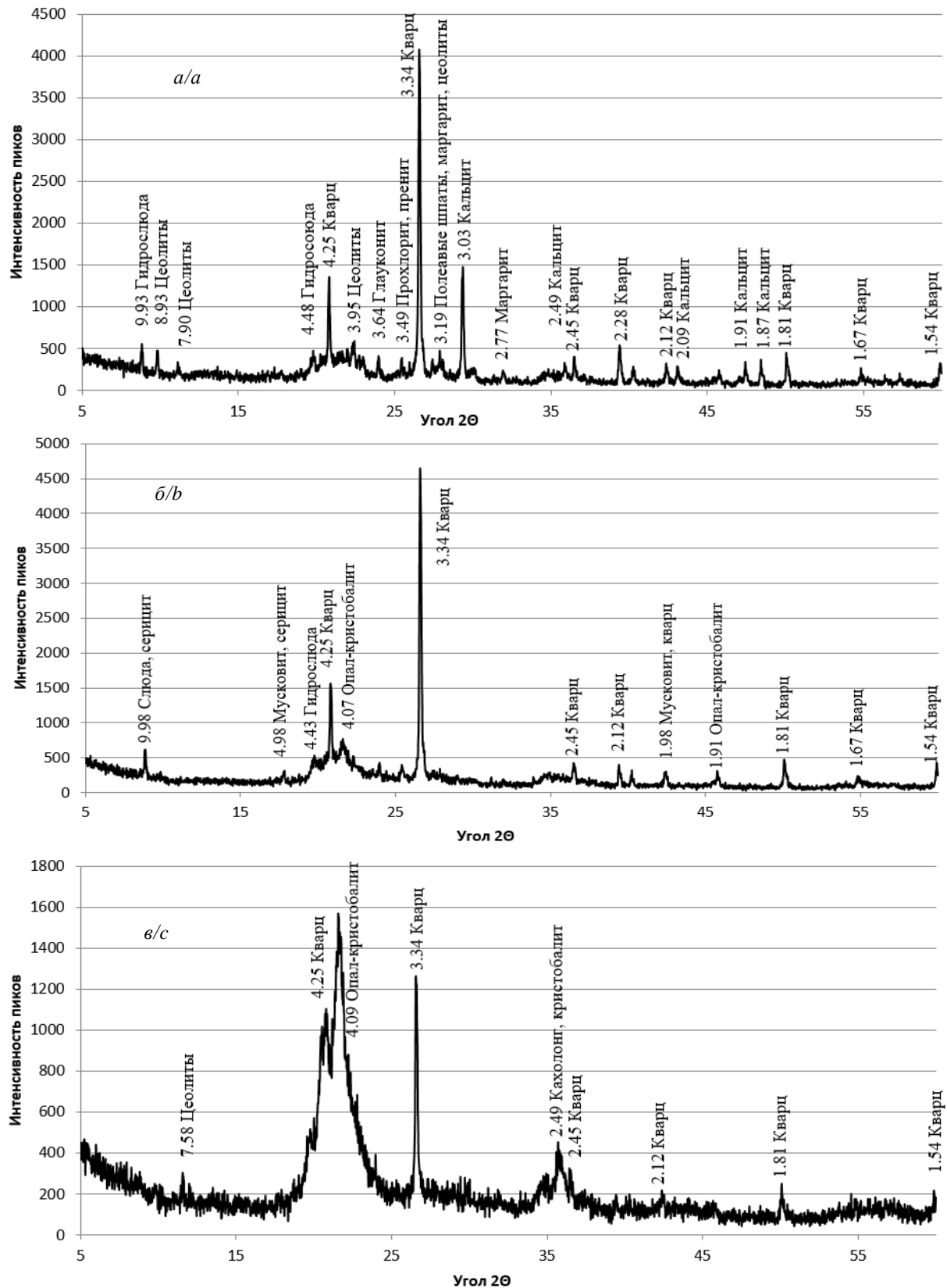


Рис. 4. Рентгенограммы опоки: а) Журавское месторождение; б) Карпово-Обрывское месторождение; в) Каменноярское месторождение

Fig. 4. X-ray gaize: a) Zhuravskoe field; b) Karpovo-Obryvskoe field; c) Kamennyarskoe field

В минеральном составе опаловидных пород можно выделить две особенности. Во-первых, опаловый кремнезём может иметь различную степень кристалличности. Он может присутствовать в виде рентгеноаморфной разновидности или, по общепринятой классификации Джонса и Сеньи, опала-А – «сильно неупорядоченной, почти аморфной фазой, с ограниченным дальним порядком», или представлен опалокристаллитом, по классификации Джонса и Сеньи, опалом-К. Переходной разновидностью между опалом-А и опалом-К является своеобразная фаза кремнезёма – тридимит-кристаллитовый опал (опал-КТ), который имеет смешанослоистую структуру. Исследователи, изучающие кремнистые породы, отмечают различную степень структурной упорядоченности опала-К и опала-КТ [15–22]. На рентгенограммах опаловидных пород степень кристалличности опалового кремнезёма чётко проявляется (рис. 4). О наличии опала говорит широкое гало в области углов $20\text{--}25^\circ 2\theta$. О наличии опалокристаллита говорит пик $4,05\text{--}4,09 \text{ \AA}$, и чем выше и острее данный пик, тем выше степень кристалличности опалового кремнезёма и тем выше степень его перехода к кристаллиту.

Во-вторых, для опаловидных пород характерным для глинистой составляющей является наличие гидрослюд и смешанослойных минералов. В кремнистых глинах или сильнглинистых опоках отмечается присутствие монтмориллонита. Гидрослюдистые и слюдястые минералы характерны для фракции 2–10 мкм, смешанослойные минералы – для более тонкодисперсных фракций. Также характерным для опаловидных пород, особенно карбонатных, является присутствие цеолитов. Часто встречаются глауконит и минералы группы хлорита. Данный набор глинистых минералов наряду с опаловым кремнезёмом предполагает начало спекания сырьевых керамических масс на основе опаловидных пород при невысоких температурах.

Микроструктура опаловидных пород может быть охарактеризована как алевро-пелитовая или органо-алевро-пелитовая. Опаловый кремнезём представлен глобулами, чешуйками, а также остатками панцирей микроорганизмов – диатомей, радиолярий, губок. Слюды и гидрослюды в основном представлены игольчатыми и таблитчатыми кристаллами (рис. 5). Алевроитовый материал – в виде неокатанных и полукатанных зёрен кварца, округлых зёрен глауконита. Смешанослойные минералы и монтмориллонит представлены тонкочешуйчатыми образованиями. В карбонатных разновидностях опаловидных пород кальцит представлен в виде остатков фораминифер и вторичных микрокристалликов.

Некоторые разновидности опаловидных пород характеризуются неяснослоистой текстурой, в которой отдельные весьма тонкие слои обогащены глинистым материалом. Эффективный диаметр пор у опаловидных пород составляет от 4 до 12 нм при удельной поверхности от 50 до $130 \text{ м}^2/\text{г}$.

За счёт мелкопористой структуры с высоким водопоглощением нетрещиноватые опаловидные породы являются достаточно морозостойкими и могут ис-

пользоваться как стеновой камень или как различные заполнители. На рис. 6 приведена фотография церкви иконы Божией Матери «Одигитрия» в хуторе Карпово-Обрывский Ростовской области, сложенная из карбонатных опок. Данное строение находится без крыши более 70 лет, сохраняя при этом свою целостность.

Ориентируясь на химический и минеральный состав опаловидных пород, изучение которых является обязательным при геологических работах, можно с высокой степенью достоверности предполагать наиболее перспективные области их применения в качестве сырья для получения различных видов строительных материалов. В табл. 3 на основе обобщения ранее проведённых и наших исследований приведены перспективные направления использования различных видов опаловидных опалокристаллитовых пород в строительной отрасли в зависимости от отнесения к выделенным типам.

На основе многочисленных исследований нами установлено, что в технологическом плане отличительной особенностью опаловидных опалокристаллитовых пород как сырья для производства изделий стеновой керамики является зависимость технологических свойств от степени их измельчения. Так, чем более тонко измельчена исходная порода, тем выше её пластичность, лучше формимость сырьевых масс, выше прочность обожжённых изделий, выше активность опалового кремнезёма и т. д. [6, 7, 9]. Это обусловлено тем, что глинистые минералы и цеолиты, входящие в состав опаловидных пород, находятся в прочном контакте с опаловым кремнезёмом и не проявляют своих свойств. При измельчении глинистые минералы высвобождаются и начинают проявлять свои пластические свойства. Поэтому для достижения необходимой пластичности и формимости необходимо измельчать породу до определённой степени.

При испытаниях опаловидных пород для стеновой керамики, на основе практического опыта, нами рекомендуется измельчать исходное сырьё до фракции 0–0,5 мм и менее. Опоки глинистые можно измельчать до фракции 0–1 мм. При этом хорошие результаты даёт вылеживание сырьевых смесей во влажном состоянии. Технологии подготовки сырья и формовки изделий могут осуществляться как пластическим способом, так и полусухим, при котором подготовка сырья заключается в полусухом измельчении, а формование изделий осуществляется из порошкообразных масс. В производстве керамических материалов выделенные группы пород могут применяться и как основное сырьё, и как добавочный компонент для улучшения технологических свойств сырья или показателей качества готовой продукции.

Как крупный и мелкий заполнитель для бетонов и смесей рекомендуемые группы могут быть использованы как в природном, но измельченном состоянии до необходимых фракций, так и в обожженном виде – термомлит.

Опаловидные породы также являются ценным сырьём для производства различных вяжущих веществ,

теплоизоляционных материалов, пеностекольных материалов при определении данными отраслями тре-

бований к качеству сырья и методик его подтверждения.

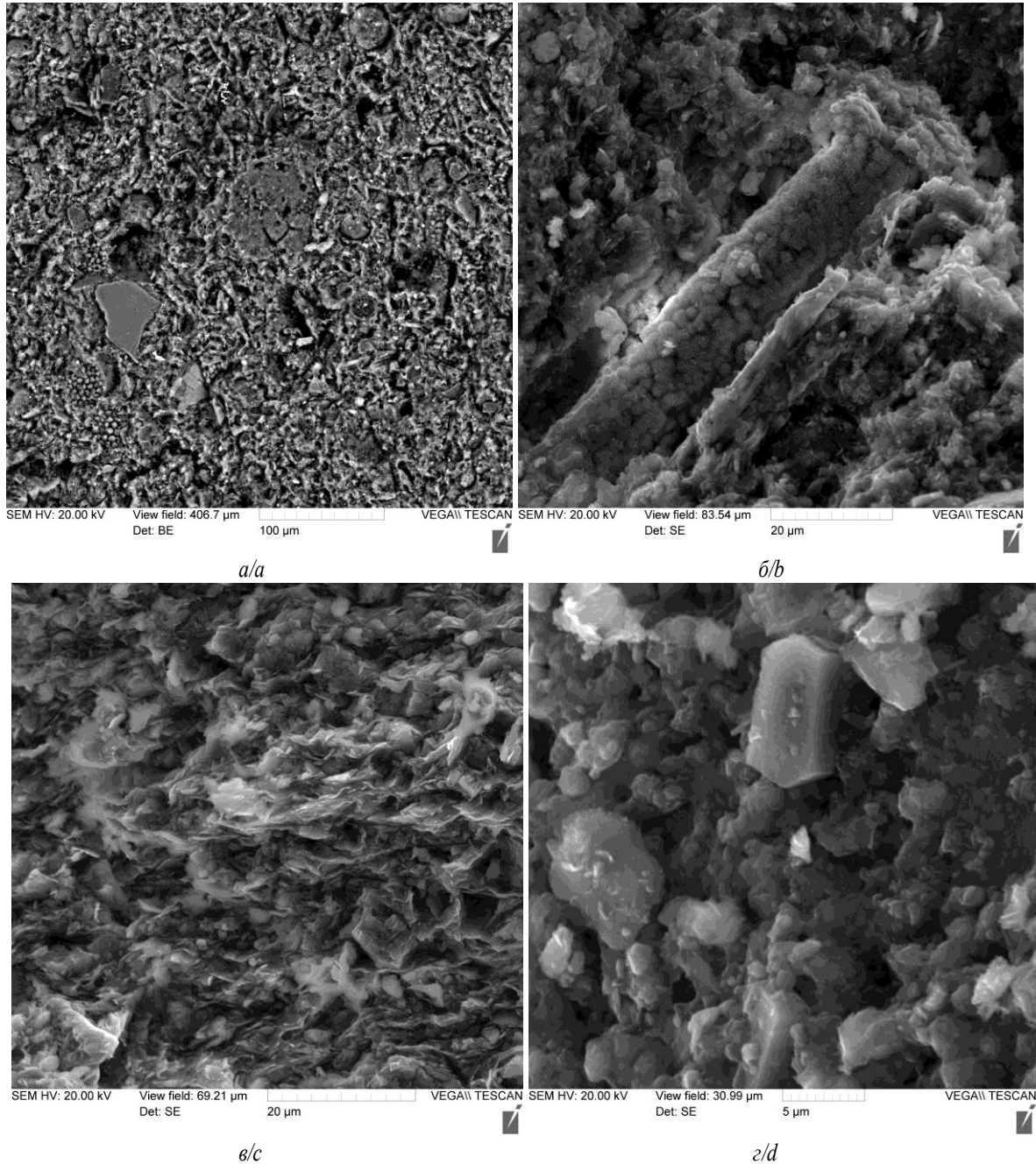


Рис. 5. Микрофотографии опалокристаллитовых пород под электронным микроскопом: а) листочки слюды, остатки диатомей, зёрна глауконита и кварца в классических опоках; б) остатки спикул губок, покрытые глобулярным опалом в глинисто-карбонатных опоках; в) хлопьевидные агрегаты опалового кремнезёма в карбонатных опоках; г) зёрна кварца, глауконита, пелитоморфного кальцита, гидрослюд в глинисто-карбонатных опоках

Fig. 5. Micrographs of opal-cristobalite rocks under a visible microscope: a) mica leaves, remains of diatoms, grains of glauconite and quartz in classical opoka; b) remains of sponge spicules covered with globular opal in clay-carbonate opoka; c) flake aggregates of opal silica in carbonate opoka; d) grains of quartz, glauconite, pelitomorphous calcite, hydromica in clay-carbonate opoka



Рис. 6. Разрушенная церковь иконы Божией Матери «Одигитрия» в Ростовской области, сложенная блоками из карбонатных опок

Fig. 6. Ruined church of the icon of the Mother of God «Hodegetria» in the Rostov region, built of blocks of carbonate gneiss

Таблица 3. Перспективные области применения опокосидных опал-кристобалитовых пород в строительстве
Table 3. Promising areas of application of opokomorphic opal-cristobalite rocks in construction

Тип опокосидных пород Facies of opokomorphic rocks	Особенности технологических свойств Features of technological properties	Перспективные области применения Promising applications
Опоки кремнеземные Silicified gneiss	Прочность – до 30–50 МПа, прочные. Не размокают в воде. Не пластичны даже при тонком измельчении Strength – up to 30–50 MPa, strong. Do not swell on wetting. Not plastic even when finely milling	Как крупный и мелкий заполнитель, посыпки в природном и модифицированном виде As coarse and fine aggregate, sprinkles in natural and modified form
Опоки классические Classical gneiss	Прочность – до 5–10 МПа, малопрочные. Размокают в воде при измельчении. Умеренно пластичны Strength – up to 5–10 MPa, low-strength. Swell on wetting during milling. Moderately plastic	Как крупный и мелкий заполнитель в модифицированном виде. Для получения легковесных стеновых керамических изделий. Как добавка к цементам, растворам и бетонам As coarse and fine aggregate in modified form. For production of lightweight wall ceramic articles. As an additive to cements, mortars and concretes
Опоки песчаные Sandy gneiss	Прочность – до 20–30 МПа, прочные. Не размокают в воде. Не пластичны даже при тонком измельчении Strength – up to 20–30 MPa, strong. Do not swell on wetting. Not plastic even when finely milling	Как крупный и мелкий заполнитель, посыпки в природном и модифицированном виде As coarse and fine aggregate, sprinkles in natural and modified form
Опоки глинистые Clay gneiss	Прочность – до 5–10 МПа, малопрочные. Медленно размокают в воде. Умеренно- и среднепластичные при тонком измельчении Strength – up to 5–10 MPa, low-strength. Slowly swell on wetting. Moderate and medium plastic with fine milling	Для получения различных видов стеновой керамики. В модифицированном виде как добавка к цементам, растворам и бетонам For the production of various types of wall ceramics. In modified form as an additive to cements, mortars and concretes
Опоки карбонатные Carbonate gneiss	Прочность – до 15–20 МПа, среднеточные. Не размокают в воде. Малопластичны при тонком измельчении Strength – up to 15–20 MPa, medium strength. Do not swell on wetting. Low plastic with fine milling	Как компонент сырьевой смеси для получения лицевого керамического кирпича светлой окраски. Для получения синтетического волластонита. Как добавка к цементам, растворам и бетонам As a component of the raw material mixture for producing a light-colored face ceramic brick. To obtain synthetic wollastonite. As an additive to cements, mortars and concretes
Опоки глинисто-карбонатные Clay-carbonate gneiss	Прочность – до 5–10 МПа, малопрочные. Медленно размокают в воде. Умеренно- и среднепластичные при тонком измельчении Strength – up to 5–10 MPa, low-strength. Slowly swell on wetting. Moderate and medium plastic with fine milling	Для получения лицевого керамического кирпича светлой окраски и других изделий стеновой керамики. Как крупный и мелкий заполнитель в модифицированном виде For the production of face ceramic bricks of light color and other products of wall ceramics. As coarse and fine aggregate in modified form

Заключение

Результаты проведённых исследований позволили классифицировать опоквидные породы по химическому и минеральному составу в качестве сырья для получения различных видов строительных материалов. Классификационными критериями определено содержание опалового кремнезёма, кварцевого кремнезёма, оксида алюминия и оксида кальция. Количество данных оксидов определяет особенности минерального состава, структурные особенности и физико-механические свойства породы. Выделено шесть типов опоквидных пород, между которыми наблюдаются плавные переходы: опоки кремнеземные; опоки классические; опоки песчаные; опоки глинистые; опоки карбонатные; опоки глинисто-карбонатные. Для каждого типа приведены перспективные области применения в строительстве – раз-

личные виды изделий стеновой керамики, различные виды вяжущих веществ, различные виды заполнителей. Комплексный подход позволит при геологических работах не просто констатировать состав опоквидных пород, а давать конкретные рекомендации по их использованию. Также, зная потребности того или иного региона России в сырьевой базе для производства различных групп строительных материалов, можно проводить целенаправленные геологические работы на поиск и оценку определённых видов опоквидных пород. Учитывая вышеизложенное, результаты работ, ресурсы и распространённость опоквидных пород в России, важным на наш взгляд является разработка общепринятых для геологов и технологов методик оценки свойств и испытаний опоквидных пород для получения тех или иных видов строительных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дистанов У.Г. Кремнистые породы СССР. – Казань: Татарское книжное издательство, 1976. – 411 с.
2. Jones J.B., Segnit E.R. The nature of opal I. nomenclature and constituent phases // *Journal of the Geological Society of Australia*. – 1971. – V. 18:1. – P. 57–68. DOI: 10.1080/00167617108728743
3. The Report of China Mineral Resource Exploration, 2018 // *China Geology*. – 2019. – V. 2. – P. 248–250. DOI: 10.31035/cg2018101
4. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Кремниевые породы. – М., 2007. – 37 с.
5. Дистанов У.Г. Минеральное сырье. Опал-кристаллитовые породы. Справочник. – М.: ЗАО «Геонформарк», 1998. – 27 с.
6. Paving clinker of low-temperature sintering on the basis of orokamorphic rocks / V.D. Kotlyar, G.A. Kozlov, O.I. Zhivotkov, K.A. Lapunova // *Materials and Technologies in Construction and Architecture*. Materials Science Forum Submitted. – 2018. – V. 931. – P. 568–572.
7. Особенности производства лицевого керамического кирпича мягкой формовки на основе опоквидных пород / В.Д. Котляр, Н.И. Небежко, Ю.А. Божко, Х.С. Явруян // *Строительные материалы*. – 2019. – № 12. – С. 18–23.
8. Malolepszy J., Stepień P. The influence of gaize addition on sulphate corrosion of CEM III/A and CEM II/B cements // *Procedia Engineering*. – 2015. – V. 108. – P. 270–276. DOI: doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.147
9. Dynamic mineralogical and structural transformations in the process of siliceous opal clays firing / K.A. Lapunova, Yu.A. Bozhko, Ya.V. Lazareva, M.E. Orlova, G.A. Kozlov // *Dynamics of Technical Systems: AIP Conference Proceedings*. XV International Scientific-Technical Conference. – 2019. – С. 060006.
10. Study of raw materials with the aim of obtaining ceramic filler and heat-insulating and structural wall ceramics / S.A. Montaeve, N.B. Adilova, N.S. Montaeve, K.Zh. Dosov, A.A. Taudaeva // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*. – 2019. – V. 9. – Iss. 5. – P. 1057–1064.
11. Darweesh H.N.M. Building materials from siliceous clay and low grade dolomite rocks // *Ceramics International*. – 2001. – V. 27 (1). – P. 45–50.
12. Aitcin P.-C. Supplementary cementitious materials and blended cements // *Science and Technology of Concrete Admixtures*. – 2016. – P. 53–73. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00004-7> (дата обращения: 15.09.2022).
13. ГОСТ 21216-2014. Сырье глинистое. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2015. – 40 с.
14. ГОСТ 8269.0-97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. – М.: Стандартинформ, 2018. – 51 с.
15. Fröhlich F. The opal-CT nanostructure // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2020. – V. 533. – P. 119938. DOI: doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.119938
16. Исследование процессов де- и регидратации поверхности опал-кристаллитовых пород методом в высоко температурной ИК-спектроскопии / Е.В. Морозкина, А.И. Матерн, В.Н. Рычков, Е.Ю. Яковлев // *Аналитика и контроль*. – 2003. – № 1. – С. 17–21.
17. Hukuo K., Hikichi Y. Composition and some properties of opal-CT rocks from the Camanosawa Formation of Tertiary age Aomori Prefecture // *Siliceous Deposits Pacific Region*. – Amsterdam, 1983. – P. 380–391.
18. Плюснина И.И., Васильева Е.Р. Модификационные превращения кремнезема и их диагностика в месторождениях различного генезиса. – Вест. МГУ. Геология. – 1983. – № 5. – С. 50–54.
19. Смирнов П.В. Фазовые переходы кремнезема в опал-кристаллитовых породах как фактор качества кремнистого сырья // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 9. – С. 6–15.
20. Jones B., Renaut R.W. Microstructural changes accompanying the opal-A to opal-CT transformation: new evidence from the siliceous sinters of Geysir, Haukadalur, Iceland // *Sedimentology*. – 2007. – V. 54. – № 4. – P. 921–949.
21. Warne S.St. J. The detection and identification of the silica minerals quartz, chalcedony, agate and opal, by differential thermal analysis. // *Inst. Fuel*. – 1970. – V. 43. – № 354. – P. 240–242.
22. De Master D.J. The diagenesis of biogenic silica: chemical transformations occurring in the water column, seabed, and crust (second edition) // *Treatise on Geochemistry*. – 2014. – № 9. – P. 103–111.

Поступила: 28.09.2022 г.

Дата рецензирования: 26.10.2022 г.

Информация об авторах

Котляр В.Д., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов Донского государственного технического университета.

Терёхина Ю.В., старший преподаватель кафедры строительных материалов Донского государственного технического университета.

UDC 552.55

MINERAL-CHEMICAL AND STRUCTURAL FEATURES OF OPOKAMORPHIC OPAL-CRISTOBALITE ROCKS AS RAW MATERIAL FOR THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Vladimir D. Kotlyar¹,
diatomit_kvd@mail.ru

Yuliya V. Terekhina¹,
yuliya-2209@mail.ru

¹ Don State Technical University,
1, Gagarin square, Rostov-on-Don, 344003, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to develop and involve opokamorphic opal-cristobalite rocks and their transitional varieties in the production of building materials for various purposes in the regions of distribution of these rocks – the central regions of Russia, the Volga region, Western Siberia, the North Caucasus.

The main aim of the research is to develop criteria and methods for the assessment of opokamorphic opal-cristobalite rocks during geological work to determine the most promising directions of their use in the production of construction materials.

Objects: explored deposits and large manifestations of opokamorphic opal-cristobalite rocks, which during geological work were evaluated narrowly and are not currently being developed or used in the production of construction materials and products.

Methods: methods for determination of physical and mechanical properties of rocks; method of quantitative chemical analysis of rocks, X-ray phase studies, electron probe studies providing the possibility of elemental analysis in the range from Na to U; methods for carrying out technological tests according to the relevant technologies for the production of building materials and products. Decoding of diffractograms was carried out using appropriate methods, by comparison with such studies, as well as using international databases.

Results. The authors have developed the classification of opokamorphic opal-cristobalite rocks by chemical and mineral composition as raw materials for the production of various types of building materials. There are four main classification criteria: the content of silica in the form of opal, the content of silica in the form of quartz, the content of aluminum oxide and calcium oxide. Six types of opokamorphic opal-cristobalite rocks were identified: silicified gaize, classical gaize, sandy gaize, clay gaize, carbonate gaize and clay-carbonate gaize. The developed classification allows, based on the data on the chemical and mineralogical composition of opokamorphic opal-cristobalite rocks, giving specific recommendations on their use for the production of certain types of building materials and predicting their properties.

Key words:

gaize, opokamorphic, opal-cristobalite rocks, building materials, chemical composition, mineral composition, opal, opal-cristobalite, research, methodology, classification.

REFERENCES

1. Distanov U.G. *Kremnistye porody SSSR* [Siliceous rocks of the USSR]. Kazan, Tatar Book Publ. house, 1976. 411 p.
2. Jones J.B., Segnit E.R. The nature of opal I. nomenclature and constituent phases. *Journal of the Geological Society of Australia*, 1971, vol. 18:1, pp. 57–68. DOI: 10.1080/00167617108728743
3. The report of china mineral resource exploration, 2018. *China Geology*, 2019, vol. 2, pp. 248–250. DOI: 10.31035/cg2018101
4. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdeniy i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Kremnievye porody* [Guidelines for the use of the classification of reserves of deposits and forecast resources of solid minerals. Silicon rocks]. Moscow, 2007. 37 p.
5. Distanov U.G. *Mineralnoe syre. Opal-kristobalitovye porody. Spravochnik* [Mineral raw materials. Opal-Cristobalite Rocks. Reference book]. Moscow, ZAO Geoinformark Publ., 1998. 27 p.
6. Kotlyar V.D., Kozlov G.A., Zhivotkov O.I., Lapunova K.A. Paving clinker of low-temperature sintering on the basis of opokamorphic rocks. *Materials and Technologies in Construction and Architecture. Materials Science Forum Submitted*, 2018, vol. 931, pp. 568–572.
7. Kotlyar V.D., Nebezsko N.I., Bozhko J.A., Yavruyan H.S. Features of the production of face ceramic brick of soft molding based on spade-shaped rocks. *Construction materials*, 2019, vol. 12, pp. 18–23.
8. Malolepszy J., Stepień P. The influence of gaize addition on sulphate corrosion of CEM II/A and CEM II/B cements. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 108, pp. 270–276. DOI: doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.147
9. Lapunova K.A., Bozhko Yu.A., Lazareva Ya.V., Orlova M.E., Kozlov G.A. Dynamic mineralogical and structural transformations in the process of siliceous opal clays firing. *AIP Conference Proceedings. XV International Scientific-Technical Conference. Dynamics of Technical Systems*. 2019. pp. 060006.
10. Montaeve S.A., Adilova N.B., Montaeve N.S., Dosov K.Zh., Taudaeva A.A. Study of raw materials with the aim of obtaining ceramic filler and heat-insulating and structural wall ceramics. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, 2019, vol. 9, Iss. 5, pp. 1057–1064.
11. Darweesh H.H.M. Building materials from siliceous clay and low grade dolomite rocks. *Ceramics International*, 2001, vol. 27 (1), pp. 45–50.
12. Aïtcin P.-C. Supplementary cementitious materials and blended cements. *Science and Technology of Concrete Admixtures*, 2016, pp. 53–73. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00004-7> (accessed 15 September 2022).
13. GOST 21216-2014. *Syre glinistoe. Metody ispytaniy* [State Standard 21216-2014. Clay material. Test Methods]. Moscow, StandardInform Publ., 2015. 40 p.
14. GOST 8269.0-97. *Shheben i graviy iz plotnykh gornnykh porod i otkhodov promyshlennogo proizvodstva dlya stroitelnykh rabot. Metody fiziko-mekhanicheskikh ispytaniy* [State Standard 8269.0-97. Crushed stone and gravel from dense rocks and industrial waste for construction work. Methods of physical and mechanical tests]. Moscow, StandardInform Publ., 2018. 51 p.
15. Fröhlich F. The opal-CT nanostructure. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2020, vol. 533, 119938. DOI: doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.119938
16. Morozkina E.V., Matern A.I., Rychkov V.N., Yakovlev E.Yu. Issledovanie protsessov de- i regidratatsii poverhnosti opal-kristobalitovykh porod metodom vysokotemperaturnoy IK-spektroskopii [The surface silica rock research using high temperature IR Spectroscopy]. *Analiitika i kontrol*, 2003, vol. 1, pp. 17–21.
17. Hukuo K., Hikichi Y. Composition and some properties of opal-CT rocks from the Camanosawa Formation of Tertiary age

- Aomori Prefecture. *Siliceous Deposits Pacific Region*. Amsterdam, 1983. pp. 380–391.
18. Plyusnina I.I., Vasilyeva E.R. Modifikatsionnye prevrashcheniya kremnezema i ikh diagnostika v mestorozhdeniyakh razlichnogo genezisa [Modification transformations of silica and their diagnostics in deposits of various genesis]. *West. MSU Geology*, 1983, vol. 5, pp. 50–54.
 19. Smirnov P.V. Fazovye perekhody kremnezema v opal-kristobalitovykh porodakh kak faktor kachestva kremnistogo syrya [Phase transitions of silica in opal-cristobalite rocks as a factor in the quality of siliceous raw materials]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 9, pp. 6–15.
 20. Jones B., Renaut R.W. Microstructural changes accompanying the opal-A to opal-CT transformation: new evidence from the siliceous sinters of Geysir, Haukadalur, Iceland. *Sedimentology*, 2007, vol. 54, no. 4, pp. 921–949.
 21. Warne S.St. J. The detection and identification of the silica minerals quartz, chalcedony, agate and opal, by differential thermal analysis. *Inst. Fuel*, 1970, vol. 43, no. 354, pp. 240–242.
 22. De Master D.J. The diagenesis of biogenic silica: chemical transformations occurring in the water column, seabed, and crust (second edition). *Treatise on Geochemistry*, 2014, vol. 9, pp. 103–111.

Received: 28 September 2022.

Reviewed: 26 October 2022.

Information about the authors

Vladimir D. Kotlyar, Dr. Sc., professor, Head of Construction materials Department, Don State Technical University.

Yuliya V. Terekhina, lecturer, Don State Technical University.

UDC 622.24.063

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF SULFONATED REFINERY PRODUCTS ON THE PROPERTIES OF WATER-BASED DRILLING FLUIDS

Irina N. Kulyashova¹,
irina-0472@yandex.ru

Oksana G. Mamaeva¹,
oxana.mamaeva2013@yandex.ru

Sergey E. Burganov¹,
bsintyola@gmail.com

Arthur R. Khalikov¹,
turkin98@mail.ru

Yulia V. Valova¹,
julyasik84@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

The relevance of the work stems from the need to develop requirements for sulfonated bitumen applied in the composition of water-based drilling fluids to control their quality when entering drilling enterprises.

Due to the presence of water-insoluble substances, sulfonated bitumens are considered to be hydrophobic bridging agents of clay rocks, though the proportion of water-soluble substances in their composition is much higher (~70 %). Nowadays the influence of the water-soluble component of sulfonated bitumen on clay rock in terms of inhibition and peptization is unknown. There are also no data on salt resistance and resistance to alkaline earth metals (Ca^{2+} , Mg^{2+}) of sulfonated bitumen. All this can lead to their irrational use. The study of these issues will help formulate requirements and select methods for assessing the quality of sulfonated bitumens, as well as improve the efficiency of their use in drilling fluids.

The main aim of the research is to experimentally determine the functional properties of sulfonated bitumen in the composition of water-based drilling fluids.

The main objectives of the research are to study the sulfonated bitumen effect on clay rocks and assess the sulfonated bitumen resistance to mineralization and divalent cations.

Objects: sulfonated bitumen samples of various brands and manufacturing plants.

Methods. The technological parameters of clay drilling fluids were determined by standard methods in accordance with SS 33213-2014 (ISO 10414-1:2008); the inhibitory and peptization properties of the research objects in relation to clay rocks were studied by the method of clay swelling when they were in the sample solution (on the Zhigach–Yarov tester) and by means of sedimentary analysis (on the Figurovsky weight scale); salt resistance of sulfonated bitumens was determined by the method of sedimentation while placing sulfonated bitumens in a mineralized environment.

Results. The authors have carried out the comparative analysis of six sulfonated bitumen samples to identify the physicochemical effect of this group reagents on clay rocks. By assessing the degree of swelling and particle-size determination of clay while its staying in the drilling fluids of the test samples, two groups of reagents of sulfonated bitumen were found, which are opposite in their functional effect on clay: 1) peptizing agents (deflocculants); 2) clay inhibitors. It was experimentally proved that all sulfonated bitumens contribute to the deterioration of the thixotropic, rheological, and filtration properties of fresh clay systems, while samples with inhibitory properties are more effective viscosity reducers; in a mineralized environment, the presence of divalent cations and sulfonated bitumens are conducive to a decrease in filtration properties, but are ineffective as viscosity reducers, and also, they are conducive to thickening due to their coagulation or solubility decrease. Experiments proved that for determining the functional purpose of high-molecular-weight sulfonated bitumens in the composition of water-based drilling fluids and controlling the quality of the samples, it is necessary to test them according to the following indicators: to determine the size of clay particles in water and in a solution of the test sample in order to identify its inhibitory or peptizing properties; to evaluate the thinning capacity and the effectiveness of reducing the filtration characteristics when adding a reagent to a fresh clay suspension.

Key words:

drilling fluids, sulfonated bitumen, sulfonated asphalt, clay swelling inhibiting, clay dispersion, coagulation.

Introduction

Many types of drilling problems which mostly depend on the composition and properties of the drilling fluid may occur during the well drilling. One of the types of such drilling problems is a damage of wellbore integrity, manifested in the form of screens and ground caving or swelling of clay-containing rocks.

During the drilling in areas where low-permeable mudstones and clay shales are located, the drilling fluid

filtrate, penetrating into the pores of the formation, sharply increases the pore pressure, which leads to rock fracturing and subsequently to screens and ground caving [1, 2].

To prevent this phenomenon, the use of bridging agents is effective. They clog the pore space inside the rock at the well-formation system, thus ending the process of filtrate invasion of the drilling fluid deep into the formation [3–6].

Recently, sulfonated bitumen or asphalts have been gaining wide popularity as bridging agents, which, when ingested into the pores and clay shales microfractures and mudstones, due to the water-insoluble component, concurrently physically clog and hydrophobize the pores, thereby avoiding the increasing of interior pressure, and quickly stop fracture spreading [7–9].

However, the presence of a water-soluble component and sulfogroups that impart anionic properties to these reagents, as well as their adsorbability on the clay's surface, predetermine the study of them as stabilizers of water-based drilling fluids. In addition, some researchers position these reagents as viscosity reducers [10]. Other researchers, on the contrary, note the thickening of drilling fluids when using these reagents [11, 12]. Understanding the effects of sulfonated bitumen impact on the operating properties of drilling fluids can extend the range and their effective implementation, as well as solve the issue of quality control of the sulfonated bitumen supplied to drilling enterprises. Therefore, this research paper presents the results of the study of effect of sulfonated bitumen

from different manufacturers on the filtration, rheological, and inhibitory properties of water-based drilling fluids, which are described from the point of view of their mechanism of action on clay.

Rationale for choosing research objects

Sulfonated bitumen (asphalt) is the sulfonated product of natural or petroleum bitumen neutralized by alkaline agents or ammonia, most of which are soluble in water [13–16].

Nowadays, sulfonated bitumen is produced by many foreign companies, primarily in China and India, as well as some Russian companies, such as CJSC «Khimpartners», LLC «Khimprom» and LLC «Arkhim». It is clear that each manufacturer produces its own individual product, the physical/chemical properties of which differ from others. Consequently, every individual product will have a different impact on drilling fluids.

During the research work, six samples of sulfonated bitumen from various brands and manufacturing plants were selected. The data are presented in Table 1.

Table 1. Samples of sulfonated bitumen tested and their physico-chemical properties

Таблица 1. Образцы сульфированных битумов, подвергшихся испытанию, и их физико-химические свойства

Sample number № образца	Sample Образец	Manufacturer Производитель	Physico-chemical properties Физико-химические свойства		
			Solubility in white spirit, % Растворимость в уайт-спирите, %	Solubility in water, % Растворимость в воде, %	pH of 1 % solution, units pH 1 %-го раствора, ед.
1	Sulfonated bitumen «AM» Сульфированный битум AM	LLC «Arkhim» ООО «Архим»	16,1	70,7	8,95
2	Sulfonated sodium asphalt «FT-1A» Сульфированный Na асфальт «FT-1A»	LLC « Unified Trading System» ООО «Единая торговая система»	9,8	72,6	8,52
3	Sulfonated sodium bitumen Сульфированный натриевый битум		14,9	67,4	8,67
4	Sulfonated sodium asphalt «FT-35» Сульфированный Na асфальт «FT-35»		11,0	69,3	8,60
5	Sulfonated bitumen Сульфированный битум	CJSC «Khimpartners» ЗАО «Химпартнеры»	20,4	72,3	8,64
6	«Asfasol» «Асфасол»	LLC «Khimprom» ООО «Химпром»	16,2	69,1	8,60

The samples were selected based on the prevalence of their use by various oil and service companies: some of them are produced in China (ООО «Unified Trading System»), and some are produced in the Russian Federation (LLC «Khimprom», CJSC «Khimpartners» and LLC «Arkhim»).

Behavioral study of sulfonated bitumen in fresh water systems

The results of the study of the sulfonated bitumen capacity to inhibit the swelling of clay, conducted by a number of researchers [17–19], have proved to be contradictory. Therefore, in order to understand the mechanism of the physico-chemical effect of the objects of study on clay, first of all, their inhibitory properties were studied. For this purpose, a clay sample weighing 10 g was placed in a cell of the Zhigach–Yarov tester,

into which water or 1 % solution with a sample of sulfonated bitumen was poured; the change in the volume of the clay sample in dynamics was recorded by an indicating gage. The dependence diagrams in Fig. 1 shows a significant decline of the clay swelling with all the test samples compared to water, reflecting the binding of water molecules by the hydrophilic part of sulfonated bitumen. At the same time, additives 1–3 suppress the clay swelling to a less extent than additives 4–6: in the first case, the increase in the height of the clay sample is 30,82–33,56 %, in the second case – 23,49–23,94 %.

The results are explained well by the sedimentation analysis data, that demonstrate the particle size of untreated bentonite in water and in solutions of sulfonated bitumen. The results are presented in Table 2.

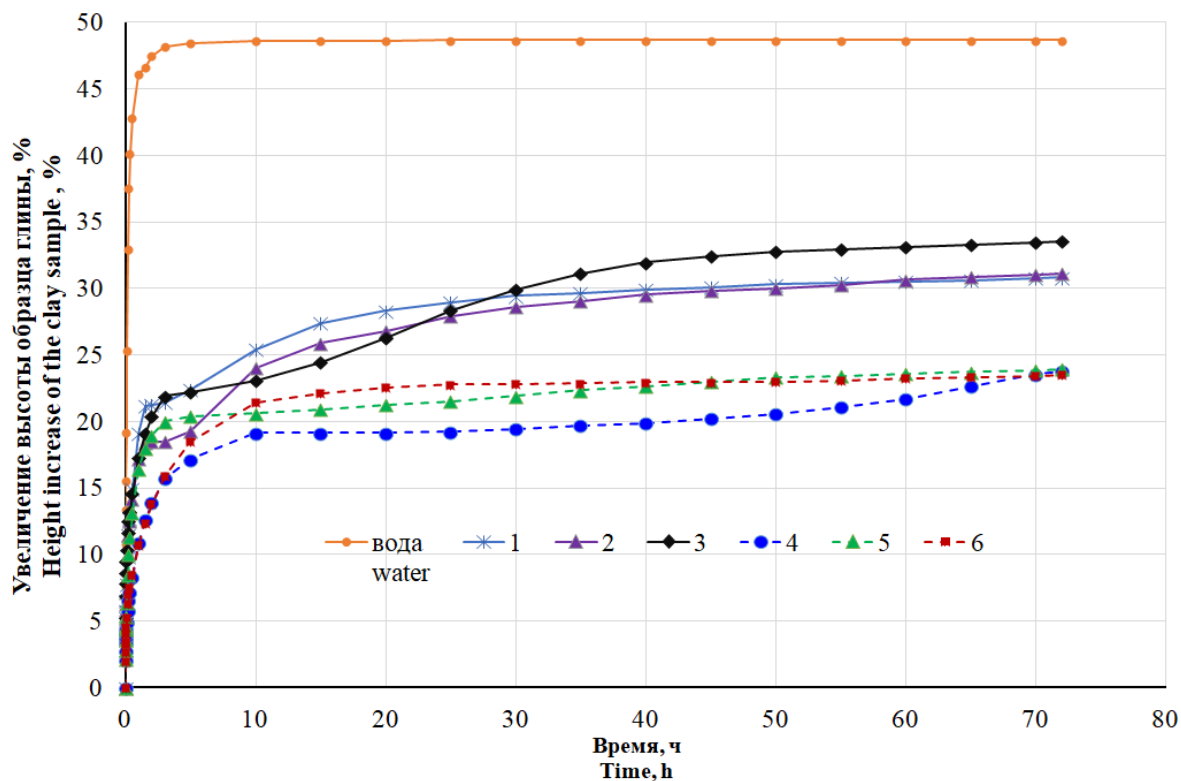


Fig. 1. Height change dynamics of clay sample when it is in water and in 1 % solutions of sulfonated bitumen tested

Рис. 1. Динамика изменения высоты образца глины при нахождении его в воде и в 1%-х растворах исследуемых сульфированных битумов

Table 2. Size distribution of clay particles in water and in 1 % solutions of sulfonated bitumen determined by sedimentation analysis on the Figurovsky weight scale

Таблица 2. Распределение частиц глины по размерам в воде и 1%-х растворах сульфированных битумов, определенных методом седиментационного анализа на приборе Фигуровского

Solution composition/Состав раствора	D50	D10-D90
	μm/мкм	
Water/Вода	8,88	6,88–19,02
Water + sample no. 1/Вода + образец № 1	8,4	5,1–11,5
Water + sample no. 2/Вода + образец № 2	5,8	4,2–8,4
Water + sample no. 3/Вода + образец № 3	8,5	6,8–10,2
Water + sample no. 4/Вода + образец № 4	15,32	11,52–20,88
Water + sample no. 5/Вода + образец № 5	15,01	9,7–28,0
Water + sample no. 6/Вода + образец № 6	17,1	9,8–32,0

D10, D50 and D90 are the sizes below which 10, 50 and 90 % of clay particles are contained.

D10, D50 и D90 обозначают размер, ниже которого содержится, соответственно, 10, 50 и 90 % частиц глины.

Table 2 shows that, samples 1–3 reduce the size of clay particles compared with their initial size – sulfonated bitumen molecules, adsorbed on the surface of clay particles, increase their hydrophilicity, resulting in the expansion of the inter-pack layers and the clay swelling; samples 4–6, on the contrary, increase the size of clay particles, which indicates the presence of coagulating components in the test additives, preventing water penetration into the interlayer space. That’s why the clay swells less.

In this way, the test samples can be divided into two groups:

- Group I – peptizing agents (deflocculants) of clays (samples 1–3);
- Group II – clay inhibitors (samples 4–6).

The mechanism of action of sulfonated bitumen samples of peptising orientation is as follows. The presence of electronegative sulfogroup – SO_3H – in the structure of hydrophilic macromolecules of sulfonated bitumen allows them to be adsorbed on positively charged corners and edges of clay particles. Due to this, the negative charge increases and the clay hydrophilizes, which results in the expansion of clay plates with the creation of new surfaces and the formation of hydrophilic shell on each of them.

In the case of using inhibitory orientation samples, clay particles, on the contrary, will stick together under the influence of coagulating components, and the effect of hydrophilic macromolecules will be limited only by hydrophilization of the outer surface of clay particles (coagulating components will hold clay plates together and suppress peptization).

Diphilic macromolecules of sulfonated bitumen are capable of hydrophobizing the clay surface – adsorbed by sulfonated hydrophilic sites on positively charged corners and edges of clay plates; they orient themselves with a hydrophobic part into the dispersion medium and prevent water penetration to the clay [20].

Analysis of sulfonated bitumen solubility in organic solvent and water (Table 1) shows that total oil and water solubility is less than 100 % and averages 85 % for sam-

ples of both groups. Consequently, at least 15 % of the sulfonated bitumen components do not dissolve either in organic solvents or in water. These microparticles should be colmatants of the filtration crust.

The significant impact of samples of both sulfonated bitumen groups on clay suggests their significant influence on the rheological and filtration properties of clay drilling fluids. The formation of labile hydrophilic and hydrophobic shells on the clay surface should reduce contact interactions and friction between solid particles and contribute to the reduction of rheological parameters. Due to the binding of free water by the hydrophilic part, the deposition of hydrophobized clay particles in the filtration crust and additional colmatation of its insoluble microparticles, sulfonated bitumen should help reduce the filtration performance of clay drilling fluids.

In this regard, there was studied the influence of the sulfonated bitumen samples on the technological properties of a clay suspension containing 35 % by weight of untreated bentonite and 0,2 % by weight of NaOH. To do this, a suspension of untreated bentonite was dissolved in tap water, to which NaOH was previously added, and kept in a heating furnace in a hermetically sealed container (pressure cooker) at 80 °C for 3 days. After 3 days, by adding tap water in portions, followed by stirring on a stirrer for 30 minutes, the clay suspension was diluted to an effective viscosity of 25–30 mPa·s; by adding 1 n NaOH, the pH was adjusted to 9,5–10,0 units. Thus, seven liters of solution were prepared.

The resulting solution was taken as the initial clay suspension (CS). 1000 ml of CS was taken, 1 % of the sulfonated bitumen sample was added, mixed for 15 minutes on a high-speed mixer (10000 rpm) and the prepared solution was left at room temperature in a hermetically sealed container for 16 hours. After the time elapsed, the solution was stirred for 15 minutes on a laboratory stirrer and the technological parameters were determined (Table 3) in accordance with SS 33213-2014 (ISO 10414-1:2008) [21]; the thixotropy coefficient K_t was calculated using a formula analogous to [22]:

$$K_t = \frac{\text{Gel 10 min} - \text{Gel 10 sec}}{10 \text{ min} - 10 \text{ sec}},$$

where Gel 10 min and Gel 10 sec are the static gel strengths for 10 min and 10 sec.

Since some researchers position sulfonated bitumen as effective viscosity reducing additives, the dilution capacity of the samples was additionally evaluated, which is defined as the percentage of reduction in the apparent viscosity of the CS after adding a sample of sulfonated bitumen to it:

$$\text{Dilution Capacity} = 100 - \frac{100 \cdot AV^s}{AV^{CS}},$$

where AV^s и AV^{CS} – apparent viscosity of the drilling fluid with the sample and the initial CS at the shear rate $1021,38 \text{ s}^{-1}$, mPa·s.

Table 3. Technological properties and dilution efficiency when adding 1 wt. % of sulfonated bitumen to CS

Таблица 3. Технологические свойства и эффективность разжижения при добавлении 1 % масс. сульфированного битума к глинистой суспензии (ГС)

Drilling fluid Раствор	Reagent type* Тип реагента	API fl. loss, ml/30 min Показатель фильтрации ПФ, мл/30 мин	pH	Plastic viscosity PV, mPa·s Пластическая вязкость ПВ, мПа·с	Yield point UP, lb/100ft ² Динамическое напряжение сдвига ДНС, фунт/100 фут ²	Gel, lb/100 ft ² Статическое напряжение сдвига СНС, фунт/100 фут ²		Thixotropy coefficient K_t Коэффициент тиксотропии K_t	Apparent viscosity AV, mPa·s Эффективная вязкость $\eta_{эф}$, мПа·с	Dilution capacity, % Разжижающая способность, %
						10 s/c	10 min мин			
CS ГС	–	14,4	9,68	4,3	50,9	74	118,1	4,5	29,7	–
CS+№ 1 ГС+№ 1	I group I группа	9,9	9,43	17,5	17,6	7,7	43,4	3,6	26,3	11,5
CS+№ 2 ГС+№ 2		13,7	9,18	8,2	29,7	36,8	77,7	4,2	23,0	22,5
CS+№ 3 ГС+№ 3		13,9	9,74	6,9	28,9	25,4	68,2	4,4	21,4	28,1
CS+№ 4 ГС+№ 4	II group II группа	12,8	9,42	17,8	7,4	3,8	24,7	2,1	21,5	27,6
CS+№ 5 ГС+№ 5		10,3	9,32	18,0	5,9	0,5	29,0	2,9	21,0	29,3
CS+№ 6 ГС+№ 6		9,9	9,64	21,0	4,7	5,9	28,4	2,3	23,3	21,5

*I group – peptizers; II group – inhibitors.

*I группа – пептизаторы; II группа – ингибиторы.

The data in Table 3 demonstrate, that all additives contribute to a decrease in the parameters of the Gel characterizing the thixotropic properties of the system, while drilling fluids with group I reagents (peptizers) have higher values of the thixotropy coefficient ($K_t \geq 3,6$) compared to the values of group II ($K_t < 3$), which indicates active structurization in the system in the presence of a peptizing orientation and suppression of this process in the presence of an inhibitory orientation of sulfonated bitumen. Lower yield value (YP), which characterizes the electrochemical interactions between particles of the dispersed phase during the flow of the drilling fluid, are observed in systems with samples of group II (inhibitors); on average the dilution capacity is higher in reagents of this group.

Low efficiency of reducing rheological parameters by group I reagents (peptizers) is apparently due to an increase in the degree of the clay phase dispersion and, accordingly, an increase in the surface area of clay on which sulfonated bitumen macromolecules can be adsorbed. The adsorption of macromolecules on new surfaces leads to a lack of them, as a result of which some clay particles do not have hydrophilic and hydrophobic shells that reduce contact interactions and friction between solid particles. Thus, effective viscosity reducing agents in fresh systems are samples of sulfonated bitumen with inhibitory properties.

The addition of sulfonated bitumen to the CS helps to reduce the filtration rate, but there is no significant difference between the samples of both groups.

Investigation of sulfonated bitumen behavior in mineralized systems

Often, drilling fluids with a high degree of mineralization or containing alkaline-earth metals (Ca^{2+} , Mg^{2+}) are used in drilling technology. In this case, the requirements for reagents to maintain their effectiveness in the presence of salts and bivalent cations increase. The research [23] shows high resistance to strong electrolytes (KCl, $CaCl_2$) of Na-salts of sulfonated humic acids. This gave us reason to assume that a similar salt resistance may be characteristic of sulfonated bitumen.

In this regard, clay solutions with samples of the tested sulfonated bitumen (1 wt. %), the description of the preparation of which is presented above, were polluted with highly mineralized reservoir water. To do this, 450 ml of the finished solution was taken, 50 ml of highly mineralized reservoir water was added, stirred for 15 minutes on a high-speed mixer (10000 rpm) and the prepared solution was left at room temperature in a hermetically sealed container for 16 hours. Similarly, the initial CS was polluted with reservoir water. After the time elapsed, the solution was stirred for 15 minutes on a laboratory stirrer and the technological parameters were determined (Table 4).

It can be seen that under conditions of high mineralization, samples of sulfonated bitumen of both groups (peptizers and inhibitors) provide lower values of the filtration index compared to the initial CS, but at the same time, the values of the Yield Point significantly increase and the thixotropic properties of the solutions deteriorate.

Table 4. Technological properties of CS containing 1 wt. % sulfonated bitumen, when adding 10 % vol. of highly mineralized reservoir water

Таблица 4. Технологические свойства ГС, содержащей по 1 % мас. образца испытуемого сульфированного битума, при добавлении 10 % об. высокоминерализованной пластовой воды

Drilling fluid Раствор	Reagent type* Тип реагента*	API fl. loss, ml/30 min, Показатель фильтрации ПФ, мл/30 мин	pH	Plastic viscosity PV, mPa·s Пластическая вязкость ПВ, мПа·с	Yield Point YP, lb/100 ft ² Динамическое напряжение сдвига ДНС, фунт/100 фут ²	Gel, lb/100 ft ² Статическое напряжение сдвига СНС, фунт/100 фут ²		Thixotropy coefficient K _t Коэффициент тиксотропии K _t	Apparent viscosity AV, mPa·s Эффективная вязкость Пэф, мПа·с	Dilution capacity, % Разжижающая способность, %
						10 s/c	10 min мин			
CS ГС	–	44,6	7,86	4,4	8	11,4	14	0,26	8,4	–
CS+№ 1 ГС+№ 1	I group I группа	31,2	7,75	2,6	35,3	30,6	36,6	0,61	20,2	–139,9
CS+№ 2 ГС+№ 2		30,8	7,77	9,9	17,8	17,6	14,5	–0,32	18,8	–124,4
CS+№ 3 ГС+№ 3		40,5	7,86	3,4	20,3	19	17	–0,20	13,5	–61,1
CS+№ 4 ГС+№ 4	II group II группа	34,2	8,24	10,3	13,1	13,8	12	–0,18	16,8	–100,1
CS+№ 5 ГС+№ 5		35,0	8,03	0,4	30,2	27,6	26	–0,16	15,5	–84,6
CS+№ 6 ГС+№ 6		32,2	8,18	3,9	26,2	17,9	14,3	–0,37	17	–102,6

*I group – peptizers; II group – inhibitors.

*I группа – пептизаторы; II группа – ингибиторы.

When mixing equal volumes of pre-filtered 1 % solutions of sulfonated bitumen with saturated sodium chloride solution (26 wt. %) in a test tube, sedimentation was

observed in all test samples (Fig. 2), which indicates coagulation or a decrease in the solubility of sulfonated samples in a mineralized environment. A similar pattern

was observed when equal volumes of 1 % solutions of sulfonated bitumen were mixed in a test tube with 0,5 % calcium chloride solution (Fig. 3); in terms of Ca^{2+} ions, this corresponds to 900 mg/l.

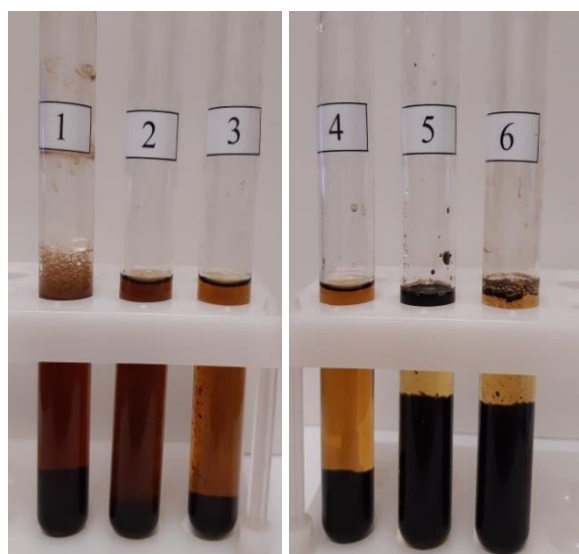


Fig. 2. Coagulation of sulfonated bitumens in the presence of NaCl (13 wt. %)

Рис. 2. Коагуляция сульфированных битумов с NaCl (13 % мас.)

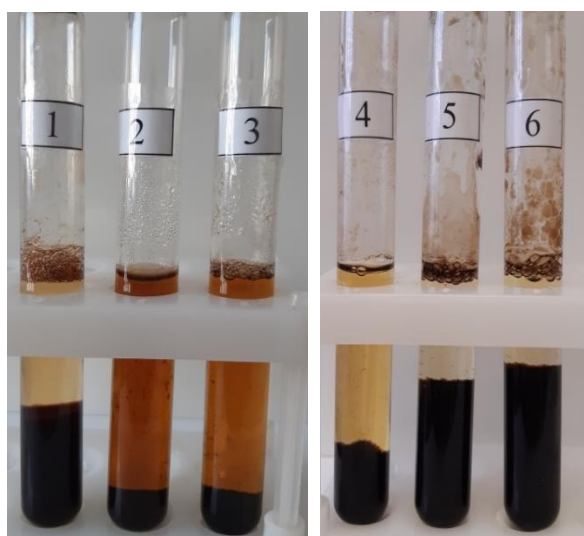


Fig. 3. Coagulation of sulfonated bitumens in the presence of CaCl_2 (900 mg/l Ca^{2+})

Рис. 3. Коагуляция сульфированных битумов с CaCl_2 (900 мг/л Ca^{2+})

Thus, sulfonated bitumen is ineffective as a viscosity reducing agent in mineralized systems and in the presence of divalent cations, such as Ca^{2+} , due to their coagulation

or reduced solubility. But this property of sulfonated bitumen can have a positive effect on the exposing of water- and brine showing layers – when interacting with the reservoir fluid, they will coagulate to form sediment and clog the formation. Determining the threshold concentrations of salts and divalent cations with the presence of which they begin to coagulate is the task of future research.

Conclusions and recommendations

1. It was revealed that there are two groups of reagents of sulfonated bitumen (asphalt) opposite in effect on clay: 1) clay peptizers (deflocculants); 2) clay swelling inhibitors. It is shown that the samples of the second group to a greater extent prevent water penetration into the interlayer space of clays and have a better liquefying ability with simultaneous improvement of filtration properties of fresh clay systems.

The first group includes reagents of the following brands: sulfonated bitumen AM of LLC «Arkhim», sulfonated Na asphalt FT-1A and sulfonated sodium bitumen of OOO «Unified Trading System». The second group of reagents includes sulfonated Na asphalt FT-35 OOO «Unified Trading System», sulfonated bitumen CJSC «Khimpartners» and Asphasol LLC «Khimprom».

2. It has been experimentally proved that sulfonated bitumen of both groups does not have a resolving ability in the presence of salts (NaCl) and divalent cations (Ca^{2+}) due to coagulation, but at the same time retains its effectiveness as filtration reducers.
3. Based on the complex of studies conducted, it was found that in order to control the quality and determine the scope of application of sulfonated additives in the composition of drilling fluids, it is necessary to test them according to the following indicators:

- determine the size of clay particles in water before and after adding the test sample to define the inhibitory properties of the reagent;
- evaluate the reagent dilution ability when it is added to a fresh clay suspension;
- determine the effectiveness of reducing filtration properties when adding a reagent to a fresh clay suspension;
- determine the effectiveness of reducing filtration properties when adding the test reagent to mineralized and divalent cation-containing systems.

Research in this direction should be continued. In the future, a more detailed study of the behavior of sulfonated bitumen in mineralized systems (type and concentration of electrolyte), as well as under the influence of elevated temperatures, is possible.

REFERENCES

1. Van Oort E., Pasturel C., Bryla J., Ditlevsen F. Improved wellbore stability in Tor/Ekofisk wells through shale-fluid compatibility optimization. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. The Hague, The Netherlands, 2017. pp. 1-24.
2. Shirokov M.N. Exceptional wellbore stability: what to do when drilling mud weighting does not work? *Drilling and oil*, 2019, no. 9, pp. 46-49. In Rus.
3. Reid P.I., Santos H. Ultra-low invasion drilling fluids: a practical route to reduced wellbore instability, reduced mud losses, wellbore strengthening and improved well productivity. *SPE/IADC Indian Drilling Technology Conference and Exhibition*. Mumbai, India, 2006. pp. 1-12.

4. Stowe C. Dzh. II, Bland R. G., Clapper D., Syan T., Benaissa S. *Burovyye rastvory na vodnoy osnove s primeneniem lateksnykh dobavok* [Water-based drilling fluids using latex additives]. Patent RF, no. 010638B1, 2008.
5. Ramirez M. A., Bishop M. D. *Wellbore drilling compositions*. Cox. Patent 11078395B2 USA, 2021.
6. Ramirez M. A., Benaissa S., Ragnes G., Almaraz A. Aluminum-based HPWBM successfully replaces oil-based mud to drill exploratory well in the Magellan Strait, Argentina. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*. Cairo, Egypt, 2007. pp. 1–11.
7. Kuzmin V.N., Trefilova T.V. Inhibition of drilling fluids with the goal of accident-free drilling of the interval of unstable clay rocks. *Online scientific publication «Neftyanaya provintsiya»*, 2020, no. 1 (21), pp. 73–82. In Rus.
8. Ryabtsev P.L. AKROS: innovative drilling fluid systems and effective drilling solutions. *Drilling and oil*, 2015, no. 3, pp. 36–38. In Rus.
9. Ishbaev G. G., Milezhko A. A., Ishbaev R. R., Petrov D. V., Mamaeva O. G., Mirsayapova R. M. *Termostoyky biopolimerny burovoy rastvor* [Heat-resistant biopolymer drilling mud]. Patent RF, no. 2711222, 2020.
10. Clampitt R.L., Russell J. A. *Sulfonated asphalt*. Cox. Patent 4514308A USA, 1985.
11. Arkhipovtsov A. A., Mayevskiy S. P., Kharitonov V. V. Import substitution of foreign reagents for drilling. Sulfonated asphalt of the Russian production. *Drilling and oil*, 2016, no. 2, pp. 48–50. In Rus.
12. Moysa Yu. N., Ivanov D. Y., Marusov M. A. Ingibiruyushchie i smazochnye dobavki dlya utyazhelennykh burovyykh rastvorov [The inhibiting and lubricant additives for the weighted drilling fluids]. *Bulatovskie chteniya* [Bulatov readings]. Krasnodar, Yug Publ. House, 2018. Vol. 3, pp. 196–205.
13. Stratton C. A. *Production of sulfonated asphalt*. Cox. Patent 3089842A USA, 1963.
14. Rooney P., Russell J. A., Brown T. D. *Production of sulfonated asphalt*. Cox. Patent 4741868A USA, 1988.
15. Prevedello A., Platone E., Donati E. *Process for preparing a sulfonated dispersant from petroleum asphalt fractions*. Cox. Patent 5322556A USA, 1994.
16. Shen Q., Xian T., Yu B. Research on the preparation of sodium asphalt sulfonate and its mechanism of fluid loss control for drilling fluids. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. San Antonio, Texas, 1995. pp. 1–21.
17. Marusov M. A., Moysa Yu. N. Lubricating and inhibiting additives for weighted drilling fluids. *Drilling and oil*, 2018, no. 11, pp. 48–50. In Rus.
18. Buyanova M. G. *Razrabotka tekhnologii primeniya i sovershenstvovanie sostavov modifitsirovannogo burovogo rastvora dlya povysheniya effektivnosti stroitelstva skvazhin*. Diss. Kand. nauk [Development of application technology and improvement of modified drilling mud compositions to improve the efficiency of well construction. Cand. Diss.]. Ufa, 2021. 190 p.
19. Clampitt R.L., Swanson B.L. *Process for making sulfonated uimtaite and well fluid additives including sulfonated uimtaite*. Cox. Patent 6514916B1 USA, 2003.
20. Huber J., Plank J., Heidlas J., Keilhofer G., Lange P. *Additive for drilling fluids*. Cox. Patent 7576039B2 USA, 2009.
21. GOST 33213-2014. *Kontrol parametrov burovyykh rastvorov v promyslovykh usloviyakh. Rastvory na vodnoy osnove* [State Standard 33213-2014 (ISO 10414-1:2008). Control of drilling fluid parameters in field conditions. Water based fluids]. Moscow, StandartInform Publ., 2015. 75 p.
22. Ryazanov Ya. A. *Entsiklopediya po burovym rastvoram* [Encyclopedia of drilling fluids]. Orenburg, Letopis Publ., 2005. 664 p.
23. Hilko S.L., Titov E. V., Fedoseeva A. A., Vliyanie silnykh elektrolitov na vodnye rastvory Na-soley nativnykh i sulfirovannykh guminovykh kislot [The effect of strong electrolytes on aqueous solutions of sodium salts of native and sulfonated humic acids]. *Kolloidny zhurnal*, 2001, vol. 63, no. 5, pp. 706–710.

Received: 12 May 2022.

Reviewed: 6 October 2022.

Information about the authors

- Irina N. Kulyashova**, Cand Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.
Oksana G. Mamaeva, Cand Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.
Artur R. Khalikov, master's student, Ufa State Petroleum Technological University.
Sergey E. Burganov, master's student, Ufa State Petroleum Technological University.
Yulia V. Valova, Cand Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 622.24.063

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СУЛЬФИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ НА СВОЙСТВА БУРОВЫХ ПРОМЫВочНЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА ВОДНОЙ ОСНОВЕ

Куляшова Ирина Николаевна¹,
irina-0472@yandex.ru

Мамаева Оксана Георгиевна¹,
oxana.mamaeva2013@mail.ru

Бурганов Сергей Евгеньевич¹,
bsintyola@gmail.com

Халиков Артур Русланович¹,
turkin98@mail.ru

Валова Юлия Владимировна¹,
julyasik84@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки требований к сульфированным битумам (асфальтам), применяемым в составе буровых растворов на водной основе, для контроля их качества при поступлении на буровые предприятия.

Вследствие наличия водонерастворимых веществ сульфированные битумы считаются гидрофобными кольматантами глинистых пород, хотя на самом деле доля водорастворимых веществ в их составе значительно выше (~70%). На сегодняшний день неизвестно влияние водорастворимой составляющей сульфированных битумов на глинистую породу с точки зрения ингибирования и пептизации. Также отсутствуют данные о солестойкости и устойчивости к щелочноземельным металлам (Ca^{2+} , Mg^{2+}) сульфированных битумов. Все это может привести к нерациональному их применению. Изучение этих вопросов поможет сформулировать требования и подобрать методы оценки качества сульфированных битумов, а также улучшить эффективность их использования в составе буровых растворов.

Цель: экспериментально определить функциональные свойства сульфированных битумов в составе буровых растворов на водной основе.

Задачи: изучить влияние сульфированных битумов на глины и оценить их устойчивость к минерализации и двухвалентным катионам.

Объекты: образцы сульфированных битумов различных марок и заводов-производителей.

Методы. Технологические параметры глинистых буровых растворов определялись стандартными методами в соответствии с ГОСТ 33213-2014 (ISO 10414-1:2008); ингибирующие и пептизирующие свойства объектов исследования по отношению к глинистой породе изучали методом набухания глины при нахождении ее в исследуемом растворе (на приборе Жигача–Ярова) и посредством седиментационного анализа (на весах Фишеровского); солестойкость сульфированных битумов определяли методом осадкообразования при нахождении их в минерализованной среде.

Результаты. Проведен сравнительный анализ шести образцов сульфированных битумов для выявления физико-химического влияния реагентов данной группы на глинистую породу. Посредством оценки степени набухания и определения размера частиц глины при нахождении ее в растворах исследуемых образцов установлено, что существует две группы реагентов сульфированных битумов, противоположных по функциональному воздействию на глину: 1) пептизаторы (дефлюлянт); 2) ингибиторы набухания. Экспериментально доказано, что все сульфированные битумы способствуют ухудшению тиксотропных, реологических и фильтрационных свойств пресных глинистых систем, при этом более эффективными понизителями вязкости являются образцы, обладающие ингибирующими свойствами; в минерализованных средах и при наличии двухвалентных катионов сульфированные битумы также способствуют ухудшению фильтрационных свойств, но неэффективны как понизители вязкости, и даже наоборот, способствуют сильному загущению, что связано с их коагуляцией, или снижением растворимости. Установлено, что для определения функционального применения высокомолекулярных сульфированных битумов в составе буровых растворов на водной основе и контроля качества образцов необходимо испытывать их по следующим показателям: определять размер частиц глины в воде и в растворе испытуемого образца с целью выявления его ингибирующих или пептизирующих свойств; оценивать разжижающую способность и эффективность снижения фильтрационных свойств при добавлении реагента к пресной глинистой суспензии.

Ключевые слова:

буровые растворы, сульфированный битум, сульфированный асфальт, ингибирование набухания глин, пептизация глин, коагуляция.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Improved wellbore stability in Tor/Ekofisk wells through shale-fluid compatibility optimization / E. Van Oort, C. Pasturel, J. Bryla, F. Ditlevsen // SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. – The Hague, The Netherlands, 2017. – P. 1–24.
2. Широков М.Н. Исключительная стабильность ствола скважины: что делать, когда не работает повышение плотности бурового раствора? // Бурение и нефть. – 2019. – № 9. – С. 46–49.
3. Reid P.I., Santos H. Ultra-low invasion drilling fluids: a practical route to reduced wellbore instability, reduced mud losses, wellbore

- strengthening and improved well productivity // SPE/IADC Indian Drilling Technology Conference and Exhibition. – Mumbai, India, 2006. – P. 1–12.
4. Буровые растворы на водной основе с применением латексных добавок: Евразийская патентная организация, № 010638: заявл. 02.08.2004; опублик. 30.10.2008. – 20 с.
 5. Wellbore drilling compositions: Patent 11078395 B2 USA. Fil. 18.06.2019; Publ. 03.08.2021.
 6. Aluminum-based HPWBM successfully replaces oil-based mud to drill exploratory well in the Magellan Strait, Argentina / M.A. Ramirez, S. Benaissa, G. Ragnes, A. Almaraz // SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition. – Cairo, Egypt, 2007. – P. 1–11.
 7. Кузьмин В.Н., Трефилова Т.В. Ингибирование буровых растворов с целью безаварийной проходки интервалов неустойчивых глинистых пород // Сетевое научное издание «Нефтяная провинция». – 2020. – № 1 (21) – С. 73–82.
 8. Рябцев П.Л. Компания «АКРОС»: инновационные системы буровых растворов и эффективные решения для бурения // Бурение и нефть. – 2015. – № 3. – С. 36–38.
 9. Термостойкий биополимерный буровой раствор: пат. Рос. Федерация, № 2711222, заявл. 15.11.2018; опублик. 15.01.2020. Бюл. № 2. – 9 с.
 10. Sulfonated asphalt: Patent 4514308 A USA. Fil. 29.07.1983; Publ. 30.04.1985.
 11. Архиповцов А.А., Маевский С.П., Харитонов В.В. Импортное замещение зарубежных реагентов для бурения. Сульфированный асфальт российского производства // Бурение и нефть. – 2016. – № 2. – С. 48–50.
 12. Мойса Ю.Н., Иванов Д.Ю., Марусов М.А. Ингибирующие и смазочные добавки для утяжеленных буровых растворов // Булатовские чтения: материалы II Международной научно-практической конференции. – Краснодар: ИД «Юг», 2018. – Т. 3. – С. 196–205.
 13. Production of sulfonated asphalt: Patent 3089842 A USA, Fil. 14.12.1959; Publ. 14.05.1963.
 14. Production of sulfonated asphalt: Patent 4741868 A USA, Fil. 04.03.1985; Publ. 03.05.1988.
 15. Process for preparing a sulfonated dispersant from petroleum asphalt fractions: Patent 5322556 A USA, Fil. 08.03.1993; Publ. 21.06.1994.
 16. Shen Q., Xian T., Yu B. Research on the preparation of sodium asphalt sulfonate and its mechanism of fluid loss control for drilling fluids // SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. – San Antonio, Texas, 1995. – P. 1–21.
 17. Марусов М.А., Мойса Ю.Н. Смазочные и ингибирующие добавки для утяжеленных буровых растворов // Бурение и нефть. – 2018. – № 11. – С. 48–50.
 18. Буянова М.Г. Разработка технологии применения и совершенствование составов модифицированного бурового раствора для повышения эффективности строительства скважин: дисс. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2021. – 190 с.
 19. Process for making sulfonated uitaite and well fluid additives including sulfonated uitaite: Patent 6514916 B1 USA, Fil. 12.09.2000; Publ. 04.02.2003.
 20. Additive for drilling fluids: Patent 7576039 B2 USA, Fil. 26.01.2005; Publ. 18.08.2009.
 21. ГОСТ 33213-2014. Контроль параметров буровых растворов в промышленных условиях. Растворы на водной основе. – М.: Стандартинформ, 2015. – 75 с.
 22. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. – Оренбург: Летопись, 2005. – 664 с.
 23. Хилько С.Л., Титов Е.В., Федосеева А.А. Влияние сильных электролитов на водные растворы Na-солей нативных и сульфированных гуминовых кислот // Коллоидный журнал. – 2001. – № 5. – С. 706–710.

Поступила: 12.05.2022 г.

Дата рецензирования: 06.10.2022 г.

Информация об авторах

Куляшова И.Н., кандидат технических наук, доцент кафедры физической и органической химии Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Мамаева О.Г., кандидат технических наук, доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Бурганов С.Е., магистрант Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Халиков А.Р., магистрант Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Валова Ю.В., кандидат гуманитарных наук, доцент кафедры иностранных языков Уфимского государственного нефтяного технического университета.

УДК 550.4 (550.424, 550.461)+550.791

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ УРАНА В РУСЛЕ РЕКИ СЕМИЗБАЙ (СЕВЕРО-КАЗАХСТАНСКАЯ УРАНОВОРУДНАЯ ПРОВИНЦИЯ)

Карпов Александр Викторович¹,
akarпов@igm.nsc.ru

Гаськова Ольга Лукинична¹,
gaskova@igm.nsc.ru

Владимиров Александр Геннадьевич¹

Анникова Ирина Юрьевна¹,
iyannikova@mail.ru

Мороз Екатерина Николаевна¹,
ekaterina.n.moroz@gmail.com

¹ Институт Геологии и Минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

Актуальность исследования состоит в необходимости поиска дешёвых источников урана вблизи потенциальных урановорудных зон Северного Казахстана на основе изучения современных процессов миграции и накопления урана.

Цель: построение геохимической модели выщелачивания, миграции и накопления урана в русле реки Семизбай на основе определения состава воды и донных отложений в речных и озерных резервуарах, а также состава гранитов Жаман-Койтасского массива и коры выветривания как коренного источника урана при его выщелачивании.

Объекты: современная кора выветривания по лейкогранитам восточной части Жаман-Койтасского массива; русловое отложение рек Семизбай и его притока Шат; прирусловое ключевые, речные и озерные воды рек Семизбай, Селеты и озера Жамантуз; донные отложения озера Жамантуз.

Методы: рентгенофлуоресцентный анализ, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, рентгеноструктурный анализ, классические методы определения катионно-анионного состава воды.

Результаты. Определены высокие содержания урана в ключевых прирусловых водах (0,32 мг/л) и водах водохранилища (0,047 мг/л), а также повышенные содержания урана в прирусловых почвах (8,6–13 г/т) и донных отложениях водохранилища (23–24 г/т) в верхнем течении реки Семизбай. На основании полученных данных предложена модель выщелачивания урана из лейкогранитов Жаман-Койтасского массива, его миграции и накопления в русле реки Семизбай, современные фации которой являются геохимическим барьером на пути распространения урана в экосистему Ишимской степи. Концентрация урана в русловых отложениях нижнего течения реки (1,9–2,7 г/т), в воде (0,0029 мг/л) и донных отложениях (4,6 г/т) озера Жамантуз, являющегося конечным сточным водоемом для реки Семизбай, отвечает фоновым содержаниям урана, характерным для Западной Сибири.

Ключевые слова:

Жаман-Койтасский массив, река Семизбай, миграция урана, геохимическая модель, Северный Казахстан, Ишимская степь.

Введение

Гидрогенными месторождениями урана являются рудные объекты, которые сформированы грунтовыми и/или пластовыми низкотемпературными водами, обогащенными ураном и сопутствующими элементами. Они распространены на всех континентах мира в проницаемых осадочных и вулканогенных отложениях от конца палеозоя до кайнозоя включительно. Этим промышленным урановым месторождениям принадлежит одно из первых мест в мире по запасам урана. В зарубежной литературе гидрогенные месторождения урана относятся преимущественно к песчаниковому типу, в котором выделяется несколько типов по морфологии оруденения и характеру восстановителя [1]. Поиски и разведка таких месторождений урана являются приоритетными, поскольку технология их эксплуатации методом подземного скважинного выщелачивания рентабельна, а извлекаемые руды находятся в низкой ценовой категории [2].

Экзогенно-эпигенетическое месторождение Семизбай, открытое в семидесятые годы прошлого века, является единственным промышленным урановорудным объектом гидрогенного типа в осадочных породах на сопряжении северо-восточной окраины Казахского щита и Западно-Сибирской плиты Урало-Сибирской эпипалеозойской платформы [3]. Непосредственный интерес к изучению этих объектов и территорий вызывают прогнозные данные, по которым южное обрамление Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции считается перспективным на обнаружение крупных урановых месторождений [4].

Одним из главных механизмов формирования месторождений песчаникового типа является осаждение урана из окислительных подземных вод на восстановительном барьере, представляющем собой водопроницаемые песчаники, обогащенные органикой, сульфидами, а также углеводородами и другими восстановителями [2]. Тем не менее механизмы образования отдельных месторождений могут быть комплексными

и многоэтапными в зависимости от конкретных геологических и гидрогеохимических условий. Коренным источником урана на месторождениях песчаникового типа являются подстилающие кристаллические породы, гранитоиды, а также уже существующие месторождения урана [5]. В этом отношении большой интерес для изучения представляют речные и замкнутые озерно-речные системы, в пределах водосбора которых располагаются гранитные массивы и урановые рудопроявления. В Северном Казахстане одним из таких примеров является система «Жаман-Койтасский массив – река Семизбай – озеро Жамантуз», расположенная на границе Северо-Казахстанской урановорудной провинции и Ишимской степи. Поэтому нами проведено тщательное гидрохимическое опробование этих объектов и предложена геохимическая модель накопления урана в современном русле реки Семизбай.

Целью работы является исследование воды и донных отложений в искусственном водохранилище и соленом озере Жамантуз, а также коренных выходов гранитов и коры выветривания, расположенных в пределах водосборной площади реки Семизбай и построение геохимической модели накопления урана на геохимических барьерах для продолжения и оптимизации поисков и разведки новых зон рудных залежей на рудном поле месторождения, а также в других однотипных бассейнах РФ и сопредельных государств.

Геологическая позиция

Исток и верховье реки Семизбай находятся в восточной части Жаман-Койтасского гранит-лейкогранитного интрузивного массива, который следует рассматривать как коренной источник урана при природном подземном и наземном выщелачивании. В верхнем течении реки Семизбай расположено два искусственных водохранилища – Кумдыколь и Семизбай. Последнее представляет собой водный резервуар (длина до 400 м, ширина до 50 м, глубина до 3 м), где в настоящее время происходит накопление урана в воде и донных осадках в естественных условиях за счет выщелачивания гранитного субстрата (рис. 1). В нескольких километрах от русла, в нижнем течении реки, где гранитный массив уже перекрыт мезозойско-кайнозойскими отложениями платформенного чехла Западно-Сибирской плиты, активно эксплуатируется экзогенно-эпигенетическое урановое месторождение Семизбай песчаникового типа [3, 6]. Конечный водоем озерно-речной системы представлен бессточным высокоминерализованным озером Жамантуз, расположенным в Ишимской степи (рис. 1, А, Б). В настоящее время река Семизбай является пересыхающей. Постоянное наличие воды наблюдается только в верхнем течении реки и водохранилищах. Русло реки Семизбай и его притока – реки Шат – наполняется водой главным образом за счет атмосферных осадков и во время весеннего половодья, сток осуществляется в восточном – северо-восточном направлении.

Следует отметить, что месторождение Семизбай находится в верхнеюрско-нижнемеловой карбонатно-глинисто-алевролитовой толще, вскрытой в бортах од-

ноименной речной палеодолины. В геоморфологическом плане месторождение расположено непосредственно на границе Казахского мелкосопочника и Ишимской степи. Эта граница, судя по геолого-геофизическим данным, отвечает резкой ступени погружающегося фундамента Западно-Сибирской плиты и имеет сложное блоковое строение. Семизбайская свита (J_3-K_1), в пределах которой сосредоточено урановое оруденение, перекрыта меловыми, палеогеновыми и четвертичными отложениями [3, 6]. Одним из ключевых моментов в модели формирования месторождения Семизбай является то, что гранит-лейкограниты Жаман-Койтасского массива являлись коренным источником урана на этом месторождении при его выщелачивании из мезозойской коры выветривания. Это подтверждается геохронологическими и геохимическими данными, а также согласуется с современными представлениями о механизмах формирования урановых месторождений песчаникового типа [2, 4, 6].

Объекты и методы исследования

Исследование воды и донных отложений в искусственном водохранилище и соленом озере Жамантуз, а также коренных выходов гранитов и коры выветривания, расположенных в пределах водосборной площади реки Семизбай, было проведено в ходе международной междисциплинарной Российско-Казахстанской гидрогеохимической экспедиции 2016 г. Положение точек отбора проб приведено на космоснимках (рис. 1, Б, В). Каталог отобранных образцов приведен в табл. 1. Проведенные региональные геохимические исследования дополняют общую картину распределения урана в Западной Сибири [8–13].

Образцы гранитов были представлены сколками весом 200–400 г. Отквартованная часть (50 г) истерта до 200 меш для последующего анализа. Пробы аркоз и почв из коры выветривания массой около 300 г были отобраны в холщовые мешки. Пробы русловых и донных озерных отложений массой около 100–200 г были отобраны в пластиковые контейнеры.

Отбор проб воды проводился в летний засушливый период. Для определения катионно-анионного состава воду отбирали с глубины 30–40 см в пластиковые бутылки объемом 1,5 л. pH и Eh определяли на месте при помощи водонепроницаемого прибора HI98121 фирмы Hanna Instruments на глубине отбора проб. Пробы воды для определения микроэлементов отбирали в пластиковые бутылки объемом 0,5 л и подкисляли 2 мл концентрированной азотной кислоты марки «ос.ч.», перегнанной дважды на установке DuoPure фирмы MileStone.

Определение макрокомпонентного состава и общей минерализации (TDS) выполнены в научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии научно-образовательного центра «Вода» ИПР ТПУ (г. Томск) с использованием стандартных методик анализа.

Микроэлементный состав воды определяли методом ИСП-МС в лаборатории изотопно-аналитической геохимии ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) с использованием масс-спектрометра высокого разрешения ELEMENT фирмы Finnigan Mat (Германия).

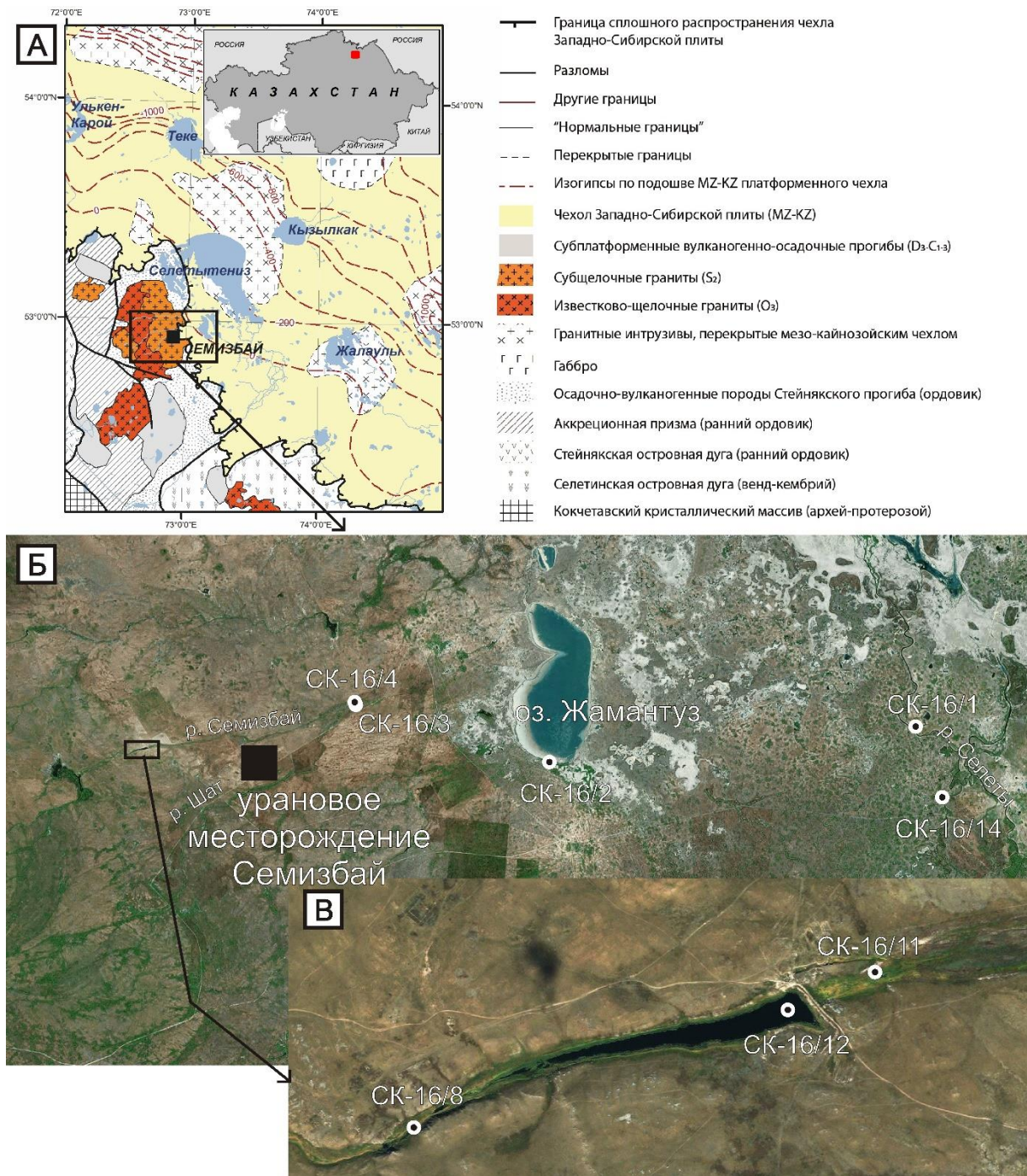


Рис. 1. Геологическая привязка проб воды и донных осадков в русле реки Семизбай и озере Жамантуз, Северный Казахстан: А) тектоническая схема области сочленения Стейнякского сегмента каледонид Северного Казахстана (Казахский мелкосопочник) и платформенного чехла Западно-Сибирской плиты (Ишимская степь). Составлена А.Г. Владимировым, С.К. Кривоноговым и А.В. Карповым по материалам государственных геологических карт СССР масштаба 1:1000000, 1:200000, фрагмент листа N-43 (Омск) [7]; Б) спутниковый снимок водосборной площади реки Семизбай. На снимке вынесены точки отбора проб гранитов, воды и донных осадков, а также месторасположение уранового месторождения Семизбай песчаникового типа; В) спутниковый снимок искусственного водохранилища в верхнем течении реки Семизбай

Fig. 1. Geological scheme and water and bottom sediment samples locations in the Semizbay riverbed and Zhamantuz lake, Northern Kazakhstan: A) tectonic scheme of the Stepiyakov segment of the Northern Kazakhstan caledonides (Kazakh uplands) and platform cover of the Western Siberian plate (Ishim steppe). Made by A.G. Vladimirov, S.K. Krivonogov and A.V. Karpov with the use of state geological maps of USSR 1:1000000, 1:200000, list fragment N-43 (Omsk) [7]; Б) satellite image of the Semizbay river catchment area. Sampling locations of granite, water and bottom sediment samples as well as location of the sandstone type Semizbay uranium deposit are shown; В) satellite image of the artificial reservoir in upper course of the Semizbay river

Таблица 1. Каталог коллекции проб гранитов, коры выветривания, донных и русловых отложений и воды по трансекту «гранитный массив – русловые отложения – озеро Жамантуз»

Table 1. Catalog of granite, weathering crust, bottom and riverbed sediments and water samples on transect «granite massif – riverbed sediments – Zhamantuz lake»

Объект Object	№ образцов Sample no.	Содержание урана Uranium content	
		порода, г/т rock, ppm	вода, мг/л water, mg/l
Верхнее течение р. Семизбай и её притока Шат Upper course of the Semizbay river and its tributary Shat river			
<i>Жаман-Койтаасский массив/Zhaman-Koytass massif</i>			
γ_1 биотит-амфиболовые гранит-лейкогранит γ_1 biotite-amphibole granite-leucogranite porphyry	СК-16/5-1, СК-16/10-3, СК-16/61, СК-16/62, СК-16/63	2,7–5,4	–
$\gamma_2^{1\text{ф}}$ – порфиroidные биотитовые лейкограниты $\gamma_2^{1\text{ф}}$ – porphyry-like biotite leucogranites	СК-16/9, СК-16/10-1, СК-16/10-2	3,3–4,8	–
A_3 – аплиты/ A_3 – aplites	СК-16/7, СК-16/12-1	2,4–6,4	–
<i>Кора выветривания по гранитам 1 фазы (γ_1)/Weathering crust on the 1 phase granites (γ_1)</i>			
Зона выщелачивания по гранитам 1 фазы (γ_1) Leaching zone on the 1 phase granites (γ_1)	СК-16/5-2, СК-16/5-3	4,6–6,6	–
Аркозы/Arkose	СК-16/5-4	2,7	–
Почвы/Soil	СК-16/5-5	2,3	–
<i>Кора выветривания по лейкогранитам 2 фазы ($\gamma_2^{2\text{ф}}$)/Weathering crust on the 2 phase leucogranites ($\gamma_2^{2\text{ф}}$)</i>			
Аркозы, аркозовые песчаники Arkose, arkosic sandstones	СК-16/11-2, СК-16/11-3, СК-16/11-4	2,7–10	–
Почвы/Soil	СК-16/11-5, СК-16/11-6	8,6–13	–
<i>Искусственное водохранилище на р. Семизбай/Artificial water reservoir on the Semizbay river</i>			
Донные отложения/Bottom sediments	СК-16/8, СК-16/12	23–24	–
Вода/Water	СК-16/12	–	0,047
<i>Прирусловые ключевые воды р. Семизбай/Spring water in bed of the Semizbay river</i>			
Вода/Water	СК-16/11	–	0,32
Нижнее течение р. Семизбай и р. Шат, оз. Жамантуз Lower course of the Semizbay and Shat rivers, Zhamantuz lake			
<i>р. Шат/Shat river</i>			
Русловые отложения/Riverbed sediments	СК-16/3	1,9	–
<i>р. Семизбай/Semizbay river</i>			
Русловые отложения Riverbed sediments	СК-16/4	2,7	–
<i>оз. Жамантуз/Zhamantuz lake</i>			
Донные отложения (береговой разрез по керну 0,2–1,2 м) Bottom sediments (shore section 0,2–1,2 m core)	СК-16/2-1, СК-16/2-2, СК-16/2-3, СК-16/2-4, СК-16/2-5	3,5–4,6	–
Вода/Water	СК-16/2	–	0,0029
Нижнее течение р. Селеты/Lower course of the Selety river			
<i>р. Селеты/Selety river</i>			
Вода/Water	СК-16/1	–	0,0019
<i>Артезианская скважина возле нижнего течения р. Селеты Artesian well near lower course of the Selety river</i>			
Вода/Water	СК-16/14	–	<0,0001

Пробы центрифугировали в течение 30 мин при 10000 об/мин, после чего разбавляли в 1000 раз водой высокой степени очистки (сопротивление 18,2 МΩ·см), полученной при помощи системы MilliQ фирмы Millipore, с добавлением внутреннего стандарта 1 мкг/л In. Определение концентраций выполнено по внешней градуировке по многоэлементным эталонным растворам.

Определение содержаний петрогенных оксидов выполнено методом рентгенофлуоресцентного анализа в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Анализируемую пробу сушили при 105 °С в течение 1 часа, затем прокаливали при 1000 °С в течение 2,5 часов, после чего 0,5 г образца смешивали с 4,5 г флюса (66,67 % тетрабората лития; 32,83 % метабората лития и 0,5 % лития бромистого). Смесь плавляли в платиновых тиглях в индукционной печи Lifumat-2,0-Ox (Linn High Therm GmbH). Полученные стекла анализировали на

рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900-XP (Thermo Electron Corporation). Для построения градуировочных графиков использовали стандартные образцы состава горных пород, а также химреактивы (петрогенные оксиды марки «ч.д.а.» и «ос.ч.»).

Определение содержаний урана, тория и других редких элементов в донных отложениях, гранитах и других породах проводили методом ИСП-МС в лаборатории изотопно-аналитической геохимии ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) с использованием масс-спектрометра высокого разрешения ELEMENT фирмы Finnigan Mat (Германия) по стандартной методике [14].

Минеральный состав аркоз, донных осадков и почв определялся рентгеноструктурным методом на дифрактометре ДРОН 3 в лаборатории геологии кайнозой, палеоклиматологии и минералогических индикаторов климата ИГМ СО РАН, г. Новосибирск (излучение CuK α , графический монохроматор). Съемка

ИК-спектров проводилась на двухлучевом спектрометре Specord 75 IR в области 400–4000 см⁻¹ с таблеткой чистого KBr в канале сравнения. Запись велась в режиме пропускания.

Результаты и обсуждение

Гранитоиды Жаман-Койтасского массива. Авторами было проведено подробное исследование гранитоидов Жаман-Койтасского массива, результаты которого представлены в отдельной, ещё не опубликованной работе. Было установлено, что восточная часть Жаман-Койтасского массива, сложенная мелко-среднезернистыми биотит-амфиболовыми гранит-лейкогранит порфирами первой интрузивной фазы (γ_1), крупнозернистыми порфиroidными биотитовыми лейкогранитами второй интрузивной фазы ($\gamma_2^{r\phi}$) и мелко-тонкозернистыми аплитами (A_3), характеризуется развитием коры выветривания и зон выщелачивания по гранит-лейкогранитам как первой, так и второй интрузивных фаз. Также было обнаружено, что эти лейкограниты характеризуются признаками аутометасоматических изменений, проявленных во вторичных изменениях породообразующих минералов: пелитизации калиевых полевых шпатов, серицитизации и сосюртитизации плагиоклазов, хлоритизации биотитов. В табл. 1 приведен диапазон содержания элементов для биотитовых лейкогранитов $\gamma_2^{r\phi}$.

По имеющимся данным для гранитоидов Жаман-Койтасского массива сложно дать количественную оценку распределения урана по минералам. Это можно сделать только для циркона – при среднем содержании урана 625 г/т он содержит лишь 4 % урана лейкогранитов $\gamma_2^{r\phi}$. Апатит и монацит ещё менее значимы ввиду их малой распространенности (P_2O_5 не более 0,05 %). Учитывая титанит-ильменит-магнетитовую специализацию лейкогранитов $\gamma_2^{r\phi}$, можно предположить, что среди аксессуарных минералов, в которых уран прочно связан в кристаллической решетке, именно они являются его главным резервуаром. Среди породообразующих минералов, в которых уран находится в легковыщелачиваемой форме, главным резервуаром, вероятнее всего, является биотит [15–17]. При этом доля такого урана в лейкократовых и биотитовых гранитах может достигать 20–50 % [15]. Эти данные косвенно указывают на то, что биотитовые лейкограниты $\gamma_2^{r\phi}$ Жаман-Койтасского массива являются благоприятным субстратом для выщелачивания урана. В пользу этого свидетельствуют эндоконтатные зоны выщелачивания, связанные с корой выветривания гранитов, а также генезис уранового месторождения Семизбай, согласно которому предполагается, что гранитоиды Жаман-Койтасского массива являлись коренным источником урана при его выщелачивании в мезозойское время [1, 6].

Таблица 2. Содержание оксидов основных элементов (мас. %), урана и тория (g/m) в гранитах (субстрат) и коре выветривания (N-Q)

Table 2. Major oxide (wt. %), uranium and thorium (ppm) content in granites (substratum) and weathering crust (N-Q)

Объект/Object	$\gamma_2^{r\phi}$	Кора выветривания (N-Q) в русле р. Семизбай Weathering crust (N-Q) in bed of the Semizbay river				
		Арkozy/аркозовые песчаники Arkose/arkosic sandstones			Почва/Soil	
Проба/Sample		СК-16/11-2	СК-16/11-3	СК-16/11-4	СК-16/11-5	СК-16/11-6
Оксид/GPS/Oxide	–	N=52.56.94' E=072.45.73'				
SiO ₂	75,10–75,38	68,78	72,70	72,03	64,87	78,10
TiO ₂	0,18–0,19	0,34	0,24	0,27	0,33	0,19
Al ₂ O ₃	12,26–12,74	12,99	13,83	14,51	9,86	7,53
Fe ₂ O ₃	1,29–2,31	2,80	1,64	1,09	5,38	3,38
MnO	0,05–0,06	0,03	0,05	0,04	0,03	0,03
MgO	0,28–0,33	0,61	0,54	0,33	1,79	0,75
CaO	0,82–0,91	1,05	1,00	0,71	4,57	1,43
Na ₂ O	3,54–3,65	2,04	4,08	3,06	1,16	1,42
K ₂ O	3,97–4,56	4,49	3,97	4,53	2,19	2,19
P ₂ O ₅	0,04–0,05	0,15	0,09	0,07	0,15	0,17
SO ₃	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,39	<0,03
ППП/LOI	0,61–0,68	5,62	1,21	2,20	8,65	3,34
Сумма/Sum	99,40–99,90	98,95	99,36	98,81	99,37	98,56
K ₂ O/Na ₂ O	1,12–1,25	2,20	0,97	1,48	1,89	1,54
Rb	77–149	115	81	90	78	66
Sr	121–128	205	287	216	361	306
Ba	482–497	603	934	997	600	619
Th	11,8–18,6	32	18	19	9,4	5,4
U	3,3–4,8	10	2,7	5,6	13	8,6
Th/U	3,6–3,9	3,2	6,8	3,4	0,71	0,62

Верхнее течение реки Семизбай. Современная кора выветривания в бортовом разрезе русла реки Семизбай (рис. 2) представлена зоной выщелачивания по лейкогранитам второй интрузивной фазы $\gamma_2^{r\phi}$, которую надстраивают арkozy и аркозовые песчаники мощно-

стью около 3 м. Эти породы имеют характерную текстуру кварцевого агрегата, сцементированного глинистой матрицей. В нижней части разрез сформирован в обводненных условиях, где арkozy пропитаны черной илистой массой. Для пород этого разреза был выпол-

нен анализ макро- и микроэлементного состава (табл. 2), а также рентгенофазовый анализ минерального состава. Состав аркоз в целом однотипен. Основные фазы представлены кварцем, плагиоклазом и калиевым полевым шпатом. В меньших количествах присутствуют смектит, каолинит, а также примеси слюды, хлорита, амфибола, кальцита, пирита. Верхний слой почвы 20–30 см; между почвой и аркозами располагается слой гальки и связывающий её цемент толщиной до 10 см. Особый интерес представляет распределение урана и тория по вертикали этого разреза. Илистые аркозы нижней части разреза (глубина 3 м) характеризуются

содержанием Th – 32 г/т, U – 10 г/т и соотношением Th/U=3,2. Аркозы средней части разреза (глубина 0,5–1 м) характеризуются более низкими содержаниями Th – 18–19 г/т и U – 2,7–5,6 г/т, соотношением Th/U=3,4–6,8, что соответствует содержаниям Th и U в лейкогранитах ${}_{\gamma_2}^{\text{rф}}$ Жаман-Койтасского массива (табл. 2). В то же время содержание U в верхних слоях почвы достигает 8,6–13 г/т, содержание Th уменьшается до 5,4–9,4 г/т, а соотношение Th/U уменьшается до 0,62–0,71. Повышенные содержания урана в верхних слоях почвы согласуются с появлением гётита в их минеральном составе.

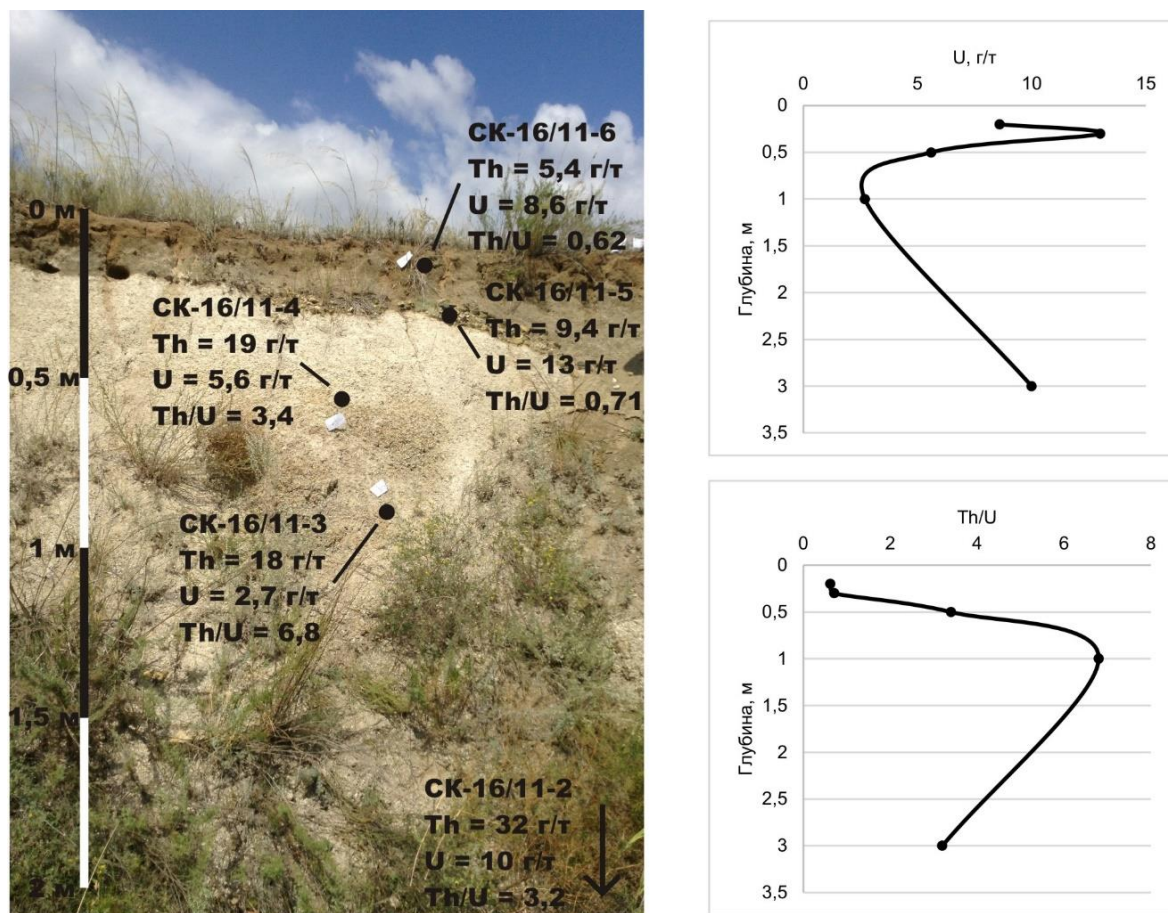


Рис. 2. Фотография коры выветривания (N-Q) в бортовом разрезе русла реки Семизбай и распределение содержания урана и соотношения Th/U по вертикали разреза. SK-16/11-6 – верхний слой почвы, глубина 0,2 м; SK-16/11-5 – галечный цемент, глубина 0,3 м; SK-16/11-4 – аркозы, глубина 0,5 м; SK-16/11-3 – аркозы, глубина 1 м; SK-16/11-2 – илистые аркозы, глубина около 3 м, не показаны на фотографии

Fig. 2. Photo of the weathering crust (N-Q) in board section of the Semizbay riverbed and vertical distribution of uranium content and Th/U ratio. SK-16/11-6 – upper soil layer, 0,2 m depth; SK-16/11-5 – pebble matrix, 0,3 m depth; SK-16/11-4 – arcose, 0,5 m depth; SK-16/11-3 – arcose, 1 m depth; SK-16/11-2 – silt arcose, about 3 m depth, not shown on the photo

Донные отложения искусственного водохранилища на реке Семизбай (верхнее течение) также характеризуются повышенными содержаниями урана (U=23–24 г/т, Th=13–14 г/т) и низкими соотношениями Th/U=0,54–0,61 (табл. 3). В минеральном составе этих отложений обнаруживаются слюда, хлорит, кальцит, следы гипса и гематита, кроме того, они богаты органикой.

Повышенные содержания урана наблюдаются и в водных источниках в верхнем течении реки Семизбай.

Содержание урана в водах искусственного водохранилища в русле реки составляет 0,047 мг/л (табл. 4), что во много раз превышает фоновые содержания урана в природных озерных и речных водах Ишимской степи [10–12], а также средние содержания урана в реках мира [18–20]. Содержание урана в ключевых водах, выходящих на поверхность в русле реки Семизбай, достигает 0,32 мг/л и сравнимо с содержанием урана в ключевых водах вблизи ураноносного озера Шаазгай-Нуур в Северо-

ро-Западной Монголии [21]. При этом необходимо отметить, что в разных регионах мира также отмечаются повышенные содержания урана (более 0,03 мг/л) в подземных водах, связанных с гранитными массивами, а наибольшие значения – в водах, связанных с гидротермально преобразованными гранитоидами [22, 23].

Воды водохранилища и ключевые воды коры выветривания характеризуются слабой соленостью (1,55–2,3 г/л), близким к нейтральному pH=7,7–7,9 и нейтральной, слабоокислительной средой (Eh=–15–119 мВ). По классификации О.А. Алёкина эти воды относятся к Cl-Na II типу.

Таблица 3. Содержание оксидов основных элементов (мас. %), урана, тория и тяжелых металлов (г/т) в донных отложениях водохранилища на р. Семизбай и соленом озере Жамантуз

Table 3. Major oxide (wt. %), uranium, thorium and trace elements (ppm) content in bottom sediments of reservoir on the Semizbay river and the saline lake Zhamantuz

Объект/Object	Водохранилище на р. Семизбай Water reservoir on the Semizbay river		Дельта р. Шат Delta of the Shat river	Русло р. Семизбай (нижнее течение) Semizbay riverbed (lower course)	оз. Жамантуз Zhamantuz lake
Проба/Sample	СК-16/8	СК-16/12	СК-16/4	СК-16/3	СК-16/2-1
Оксид/GPS/Oxide	N=52.56.81' E=072.45.18'	N=52.56.92' E=072.45.69'	N=52.58.31' E=072.57.98'	N=52.58.35' E=072.57.94'	N=52.56.42' E=073.07.71'
SiO ₂	63,59	54,83	81,03	78,85	52,79
TiO ₂	0,55	0,61	0,11	0,16	0,53
Al ₂ O ₃	12,14	11,78	9,30	9,37	10,18
Fe ₂ O ₃	3,59	5,71	1,90	1,98	6,20
MnO	0,05	0,13	0,03	0,04	0,07
MgO	1,17	1,50	0,22	0,35	3,18
CaO	1,34	4,21	0,76	0,83	3,42
Na ₂ O	2,37	1,84	2,44	2,30	5,25
K ₂ O	2,59	2,10	3,23	3,22	1,58
P ₂ O ₅	0,17	0,17	0,05	0,05	0,11
SO ₃	0,27	0,77	<0,03	<0,03	1,82
ППП/LOI	11,63	15,38	0,74	1,66	13,48
Сумма/Sum	99,44	99,02	99,85	98,88	98,59
K ₂ O/ Na ₂ O	1,09	1,14	1,32	1,40	0,30
V	71	75	19	25	106
Cr	45	163	43	40	174
Co	8,9	15	2,5	4,3	21
Ni	23	52	9,4	15	71
Cu	25	47	31	16	55
Zn	64	77	23	25	79
Rb	85	60	77	79	21
Sr	210	325	182	166	157
Ba	540	472	828	709	385
Th	13	14	4,2	3,8	7,6
U	23	24	2,7	1,9	4,6
Th/U	0,54	0,61	1,6	2,1	1,7

Таблица 4. Содержание макро- и микроэлементов (мг/л) в озерных, русловых и ключевых водах

Table 4. Macro- and microelement content (mg/l) in lake, riverbed and spring waters

Объект Object	Ключевые прирус- ловые воды р. Семизбай Spring waters in bed of the Semizbay river	Водохранилище на р. Семизбай Water reservoir on the Semizbay river	оз. Жамантуз (конечный водоём р. Семизбай) Zhamantuz lake (discharge water body of the Semiz- bay river)	р. Селеты Selety river	Артезианская скважина в нижнем течении р. Селеты Artesian well near lower course of the Selety river
Проба Sample	СК-16/11-1	СК-16/12	СК-16/2	СК-16/1	СК-16/14
GPS	N=52.56.98' E=072.46.01'	N=52.56.92' E=072.45.69'	N=52.56.42' E=073.07.71'	N=52.59.84' E=073.26.89'	N=52.55.39' E=073.29.20'
pH	7,87	7,72	7,43	8,39	8,08
Eh, мВ	–15	119	–150	172	–100
TDS	2300	1550	223000	1420	2130
HCO ₃ ⁻	490	380	580	360	750
SO ₄ ²⁻	460	370	9100	200	240
Cl ⁻	620	330	129000	420	450
Ca ²⁺	88	68	20	63	12
Mg ²⁺	67	56	4620	64	9,2
Na ⁺	570	350	79600	305	660
K ⁺	4,0	6,6	160	4,5	5,3
Sr	2,3	1,5	9,8	0,92	0,29
B	0,30	0,05	16	0,41	3,5
Li	0,037	0,038	0,29	0,012	0,016
U	0,32	0,047	0,0029	0,0019	<0,0001

Корреляции между содержанием урана и тория (рис. 3) и низкое соотношение Th/U (ниже, чем в подстилающих их аркозах и гранитах) показывают, что русловые отложения в верхнем течении реки Семизбай обогащены ураном. Его содержание в них в несколько раз превышает содержание в русловых отложениях нижнего течения реки и донных отложениях соленых озер Ишимской степи, включая озеро Жамантуз. Эти

отложения характеризуются низкими фоновыми содержаниями урана, типичными для Западной Сибири [8–13]. Ранее авторами и их коллегами было установлено, что верхние слои донных отложений озер Ишимской степи характеризуются низкими фоновыми содержаниями урана, а процессы накопления и перераспределения урана и тяжелых металлов главным образом контролируются процессами солевой дефляции [10, 11].

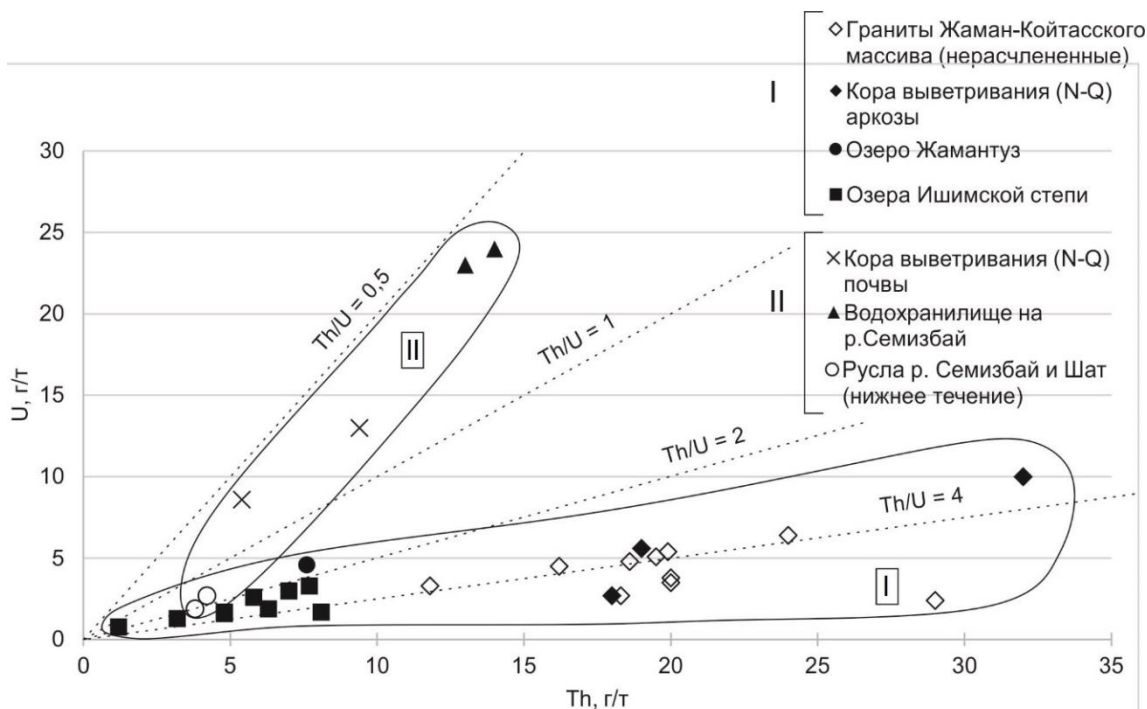


Рис. 3. Корреляция между содержанием урана и тория в русловых отложениях р. Семизбай. I – поле составов донных отложений озера Жамантуз и других соленых озер Ишимской степи, русловых отложений нижнего течения р. Семизбай и Шат, аркоз коры выветривания (N-Q) и гранитов Жаман-Койтасского массива. II – поле составов верхних слоев почвы и русловых отложений верхнего течения р. Семизбай, обогащенных ураном

Fig. 3. Correlation between uranium and thorium content in bed sediments of the Semizbay river. I – field of bottom sediments of the Zhamantuz lake and other lakes of the Ishim steppe, bed sediments of Semizbay and Shat rivers, arcose of the weathering crust (N-Q) and granites of the Zhaman-Koytass massif. II – field of uranium enriched upper soil layers and bed sediments in upper course of the Semizbay river

На основе изложенных выше геологических и гидрогеохимических данных нами предложена геохимическая модель выщелачивания, миграции и накопления урана в воде, русловых отложениях реки Семизбай и соленом озере Жамантуз (рис. 4). Согласно этой модели, лейкограниты ${}_{\text{U}}\gamma_2^{\text{r}\Phi}$ Жаман-Койтасского массива являются коренным источником урана при его выщелачивании из современной коры выветривания. Выщелачивание урана происходит, предположительно, атмосферными осадками, формирующими поверхностный и подземный сток. Вместе с подземными и наземными водами выщелоченный уран переносится ниже по течению реки Семизбай. В местах выхода на поверхность обогащенных ураном ключевых вод часть урана сорбируется в русловых отложениях и верхних слоях почвы, а также накапливается в водах и донных отложениях искусственного водохранилища на реке Семизбай. Низкие фоновые содержания урана в русловых отложениях в нижнем течении реки Семизбай и в донных отложениях озера Жамантуз, а

также в речных, озерных и подземных водах (табл. 1, 2) свидетельствуют о наличии геохимического барьера, который географически расположен, вероятнее всего, вблизи границы сплошного распространения чехла Западно-Сибирской плиты и в непосредственной близости от месторождения Семизбай (рис. 1, Б). Верхний рудный горизонт месторождения Семизбай отделен от поверхности несколькими водоносными горизонтами – современным-верхнечетвертичным, люлинворским и первым верхнесемизбайским комплексом верхней юры – нижнего мела [24]. Поэтому, вероятнее всего, отложения, на которых происходит осаждение урана, стратиграфически относятся к P_g-N-Q платформенному чехлу Западно-Сибирской плиты и представляют собой современные фации заиливающегося русла реки Семизбай. Эта гипотеза требует дополнительных исследований, в первую очередь, в рудном поле эпигенетически-инфильтрационного месторождения Семизбай, в настоящее время закрытого его собственниками для экспедиционных работ.

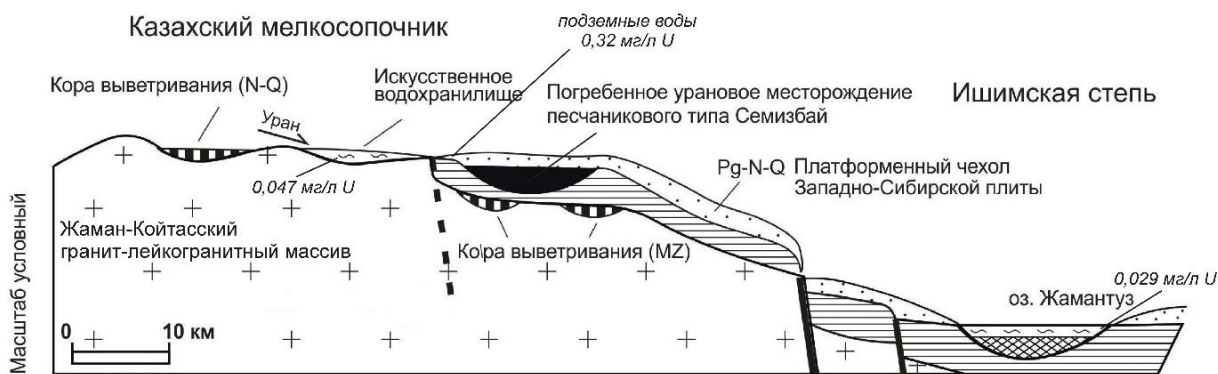


Рис. 4. Геохимическая модель выщелачивания урана из аркозовой коры выветривания (N-Q) по гранит-лейкогранитам Жаман-Койтасского массива, его миграции и накопления в русле реки Семизбай

Fig. 4. Geochemical model of uranium leaching from the arcogenic weathering crust (N-Q) after granite-leucogranites of the Zhaman-Koytass massif, and its migration and deposition in the Semizbay riverbed

Воды, выходящие на поверхность вблизи водохранилища, характеризуются $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$ составом и близкими к нейтральным значениями $\text{pH}=7,87$ и $\text{Eh}=-15$ мВ. В этих условиях уран находится в степени окисления VI. Необходимо отметить, что эти условия близки к границе, разделяющей формы урана IV и VI [25], которые значительно отличаются друг от друга миграционными свойствами [26]. Учитывая это, можно предположить, что миграция урана в подземных водах осуществляется преимущественно в виде карбонатных и гидрокарбонатных комплексов уранил-катиона [26–28]. В верхних слоях почвы и русловых отложениях в верхнем течении реки Семизбай уран, судя по их минеральному составу, преимущественно связан с гётитом, а также с глинистыми минералами и органическим веществом [26, 27].

Заключение

Русловые отложения, а также верхние слои почвы в верхнем течении реки Семизбай содержат повышенные концентрации урана ($\text{U}=8,6\text{--}24$ г/т, $\text{Th/U}=0,54\text{--}0,71$). Кроме того, содержание урана в искусственном водохранилище на реке Семизбай составляет 0,047 мг/л, а в ключевых прирусловых водах достигает 0,32 мг/л. Эти значения во много раз превышают фоновые содержа-

ния как в речных, озерных и подземных водах, так и в донных озерных отложениях Ишимской степи. На основании полученных данных предложена геохимическая модель выщелачивания урана из лейкогранитов Жаман-Койтасского массива. Его миграция происходит вместе с подземными и поверхностными водами. Осаждение и накопление урана, вероятнее всего, происходит в современных фациях заливающегося русла реки Семизбай.

Установленные авторами закономерности строения рудовмещающих осадочных толщ, литолого-фациальной и эпигенетической окислительно-восстановительной зональности, пределов накопления урана являются основой для продолжения научных исследований, а также систематических поисков и разведки новых урановорудных зон на рудном поле месторождения Семизбай.

Авторы благодарят О.П. Герасимову, Л.В. Куйбиду, О.Ю. Дубровину и Т.В. Мирясову за помощь в проведении экспедиционных работ, техническую поддержку при обработке аналитических данных и подготовке статьи.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН. Аналитические работы выполнены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винокуров С. Ф. Типизация гидрогенных месторождений урана // Геология рудных месторождений. – 2022. – Т. 64. – № 1. – С. 113–134.
2. Uranium 2020: resources, production and demand. A joint report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. – NEA, OECD, 2020. – 480 p.
3. Урановые месторождения Казахстана (экзогенные) / Н.Н. Петров, В.Г. Языков, Х.Б. Аубакиров, В.Н. Плеханов, А.Ф. Вершков, В.Ф. Лухтин. – Алматы: Гылым, 1995. – 264 с.
4. Афанасьев Г.В., Миронов Ю.Б., Пинский Э.М. Новые аспекты формирования урановых месторождений песчаного типа // Региональная геология и металлогения. – 2014. – № 59. – С. 89–96.
5. Descriptive uranium deposit and mineral system models. – IAEA, 2020. – 313 p.
6. Кондратьева И.А., Боброва Л.Л. Геологическое строение и особенности рудогенеза месторождения Семизбай. Минеральное сырье. Серия методическая № 11. – М.: ВИМС, 2011. – 44 с.
7. Геологическая карта СССР масштаба 1:1000000. Лист N-43 (Омск). Объяснительная записка. – М.: Госгеолтехиздат, 1962. – 265 с.
8. 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.
9. Иванов А.Ю. Уран и торий в донных отложениях непроточных водоемов юга Томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 159–165.
10. Уран и торий в донных отложениях соленых озер Ишимской степи (Северный Казахстан) / А.В. Карпов, А.Г. Владимиров, Л.И. Разворотнева, С.К. Кривоногов, И.В. Николаева, Е.Н. Мороз // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 9. – С. 6–17.
11. Главные факторы концентрирования урана в минерализованных озерах Ишимской степи (Западная Сибирь) / А.Г. Владимиров, С.К. Кривоногов, А.В. Карпов, И. Николаева В., Л.И. Разворотнева, М.Н. Колпакова, Е.Н. Мороз // Доклады Академии Наук. – 2018. – Т. 479. – № 6. – С. 659–665.

12. Saline lakes of Northern Kazakhstan: geochemical correlations of elements and controls on their accumulation in water and bottom sediments / M.N. Kolpakova, O.L. Gaskova, O.S. Naymushina, A.V. Karпов, A.G. Vladimirov, S.K. Krivonogov // *Applied Geochemistry*. – 2019. – V. 107. – P. 8–18.
13. Malikova I.N., Strakhovenko V.D., Ustinov M.T. Uranium and thorium contents in soils and bottom sediments of lake Bolshoye Yarovoye, western Siberia // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2020. – V. 211. – 106048.
14. Определение основных и примесных элементов в силикатных породах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой после сплавления с LiBO₂ / И.В. Николаева, С.В. Палесский, О.С. Чирко, С.М. Черножжик // *Аналитика и контроль*. – 2012. – Т. 16. – № 2. – С. 134–142.
15. Ножжик А.Д., Туркина О.М. Геохимия гранулитов канского и шарыжалгайского комплексов. – Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1993. – 291 с.
16. Rene M. Alteration of granitoids and crystalline rocks and uranium mineralization in the Bor pluton area, Bohemian Massif, Czech Republic // *Оre Geology Reviews*. – 2017. – V. 81. – P. 188–200.
17. Whole-rock and biotite geochemistry of granites from the Miao'ershan batholith, South China: implications for the sources of the granite-hosted uranium ores / L. Zhang, Z. Chen, F. Wang, T. Zhou // *Оre Geology Reviews*. – 2021. – V. 129. – 103930.
18. Palmer M.R., Edmond J.M. Uranium in river water // *Chochimica et Cosmochimica Acta*. – 1993. – V. 57. – P. 4947–4955.
19. Uranium in rivers and estuaries of globally diverse, smaller watersheds / H. Windom, R. Smith, F. Niencheski, C. Alexander // *Marine Chemistry*. – 2000. – V. 68. – P. 307–321.
20. Molybdenium, vanadium and uranium weathering in small mountainous rivers and rivers draining high-standing islands / C.B. Gardner, A.E. Carey, W.B. Lyons, S.T. Goldsmith, B.C. McAdams, A.M. Tierweiler // *Chochimica et Cosmochimica Acta*. – 2017. – V. 219. – P. 22–43.
21. Геохимическая модель накопления урана в озере Шаазгай-Нуур (Северо-Западная Монголия) / В.П. Исупов, С. Ариунбилэг, Л.И. Разворотнева, Н.З. Ляхов, С.Л. Шварцев, А.Г. Владимиров, М.Н. Колпакова, С.С. Шацкая, Л.Э. Чупахина, Е.Н. Мороз, Л.В. Куйбыда // *Доклады Академии Наук*. – 2012. – Т. 447. – № 6. – С. 658–663.
22. Distribution and potential health risk of groundwater uranium in Korea / W. Shin, J. Oh, S. Choung, B.-W. Cho, K.-S. Lee, U. Yun, N.-C. Woo, H.K. Kim // *Chemosphere*. 2016. – V. 163. – P. 108–115.
23. Papageorgiou F., McDermott F., Van Acken D. Uranium in groundwaters: insights from the Leinster granite, SE Ireland // *Applied Geochemistry*. – 2022. – V. 139. – 105236.
24. Перспективы подземного скважинного выщелачивания урана на месторождении Семизбай / Э.А. Пирматов, С.А. Дюсамбаев, Б.О. Дуйсебаев, Е.Е. Жатканбаев, Л.С. Вятченникова, Г.А. Садырбаева // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2006. – № 11. – С. 246–254.
25. Takeno N. Atlas of Eh-pH diagrams. Intercomparison of thermodynamic databases. – Tokyo: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2005. – 285 p.
26. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. Издание второе, дополненное – М.: Центр ЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.
27. Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Уран. – Новосибирск: ПНТБ СО РАН, 2014. – 127 с.
28. Страховенко В.Д., Гаськова О.Л. Термодинамическая модель образования карбонатов и минеральных фаз урана в озерах Намши-нур и Цаган-тырм (Прибайкалье) // *Геология и геофизика*. – 2018. – Т. 59 – № 4 – С. 467–480.

Поступила: 17.07.2022 г.

Дата рецензирования: 26.09.2022 г.

Информация об авторах

Карпов А.В., младший научный сотрудник Института Геологии и Минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Гаськова О.Л., ведущий научный сотрудник Института Геологии и Минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Владимиров А.Г., главный научный сотрудник Института Геологии и Минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Анникова И.Ю., старший научный сотрудник Института Геологии и Минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Мороз Е.Н., ведущий инженер Института Геологии и Минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

UDC 550.4 (550.424, 550.461)+550.791

GEOCHEMICAL MODEL OF URANIUM ACCUMULATION IN THE SEMIZBAY RIVERBED (NORTHERN KAZAKHSTAN URANIUM ORE PROVINCE)

Alexander V. Karpov¹,
akarpov@igm.nsc.ru

Olga L. Gaskova¹,
gaskova@igm.nsc.ru

Alexander G. Vladimirov¹

Irina Yu. Annikova¹,
iyannikova@igm.nsc.ru

Ekaterina N. Moroz¹,
ekaterina.n.moroz@gmail.com

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,
3, Ac. Koptuyg avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the research is caused by the need of exploration of cheap uranium sources near potentially uranium ore bearing areas of Northern Kazakhstan based on studying modern processes of migration and accumulation of uranium.

The main aim is to propose a geochemical model of leaching, migration and accumulation of uranium in the Semizbay riverbed based on determining water and bottom sediment composition of river and lake reservoirs, and composition of the Zhaman-Koytass massif and its weathering crust as a primal source of uranium.

Objects: modern weathering crust of leucogranites of the eastern part of the Zhaman-Koytass massif; bed sediments of the Semizbay river and its tributary Shat river; riverbed spring, river and lake waters of the Semizbay, Seley rivers and Zhamantuz lake; bottom sediments of the Zhamantuz lake.

Methods: x-ray analysis, inductively coupled plasma mass spectrometry, x-ray crystallography, classic methods of determination of cation and anion composition.

Results. High concentrations of uranium in spring riverbed waters (0,32 mg/l) and artificial reservoir (0,047 mg/l) as well as elevated concentrations of uranium in riverbed soil (8,6–13 ppm) and bottom sediments of artificial reservoir (23–24 ppm) in the upper course of the Semizbay river were found. Based on the collected data the authors have proposed the geochemical model of uranium leaching from leucogranites of the Zhaman-Koytass massif, its migration and accumulation in the Semizbay riverbed, the modern facies of which act as the geochemical barrier on the way of uranium migration to ecosystem of the Ishim steppe. Uranium concentrations in riverbed sediments in lower course of the Semizbay river (1,9–2,7 ppm), as well as in water (0,0029 mg/l) and bottom sediments (4,6 ppm) of the Zhamantuz lake, which is the final discharge waterbody of the Semizbay river, represent background uranium concentrations in Western Siberia.

Key words:

Zhaman-Koytass massif, Semizbay river, uranium migration, geochemical model, Northern Kazakhstan, Ishim steppe.

Authors thank Oleg P. Gerasimov, Leonid V. Kuibida, Olga Yu. Dubrovina and Tatiana V. Miryasova for their help in conducting expedition work as well as technical help during reduction of the analytical data and writing the paper.

The work was carried out according to the state assignment of IGM SB RAS. Analytical procedures were completed in the Analytical Center for multi-elemental and isotope research SB RAS.

REFERENCES

- Vinokurov S.F. Tipizatsiya gidrogennykh mestorizhdeniy urana [Typification of uranium deposits of fluid-origin]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 2022, vol. 64, no. 1, pp. 113–134.
- Uranium 2020: resources, production and demand. A joint report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency*. NEA, OECD Publ., 2020, 480 p.
- Petrov N.N., Yazikov V.G., Aubakirov Kh.B., Plekhanov V.N., Vershkov A.F., Lukhtin V.F. *Uranovye mestorozhdeniya Kazakhstana (ekzogennye)* [Uranium deposits of Kazakhstan (exogenous)]. Almaty, Gylm Publ., 1995. 264 p.
- Afanasyev G.V., Mironov Yu.B., Pinskiy E.M. New aspects of forming of sandstone-type uranium deposits. *Regional Geology and Metallogeny*, 2014, no. 59, pp. 89–96. In Rus.
- Descriptive uranium deposit and mineral system models*. IAEA Publ., 2020. 313 p.
- Kondrateva I.A., Bobrova L.L. *Geologicheskoe stroenie i osobennosti rudogenezha mestorozhdeniya Semizbay* [Geological structure and ore genesis peculiarities of the Semizbay deposit]. Moscow, VIMS Publ., 2011. 44 p.
- Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:1000000. List N-43 (Omsk). Obyasnitelnaya zapiska* [Geological map of the USSR 1:1000000 scale. List N-43 (Omsk). Explanatory note]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1962. 265 p.
- Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L., Malikova I.N., Vosel Yu.S. The regularities of distribution of radionuclides and rare-earth elements in bottom sediments of Siberian lakes. *Geology and geophysics*, 2010, vol. 51, no. 11, pp. 1501–1514. In Rus.
- Ivanov A.Yu. Uranium and thorium in bottom sediments of stagnant water reservoirs of south of Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 1, pp. 159–165. In Rus.
- Karpov A.V., Vladimirov A.G., Razvorotneva L.I., Krivonogov S.K., Nikolaeva I.V., Moroz E.N. Uranium and thorium in sediments of the Ishim plain lakes (Northern Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 7, pp. 6–17. In Rus.

11. Vladimirov A.G., Krivonogov S.K., Karpov A.V., Nikolaeva I.V., Razvorotneva L.I., Kolpakova M.N., Moroz E.N. The main factors of uranium accumulation in the Ishim plain saline lakes (Western Siberia). *Doklady Earth Sciences*, 2018, vol. 479, no. 2, pp. 511–517.
12. Kolpakova M.N., Gaskova O.L., Naymushina O.S., Karpov A.V., Vladimirov A.G., Krivonogov S.K. Saline lakes of Northern Kazakhstan: geochemical correlations of elements and controls on their accumulation in water and bottom sediments. *Applied Geochemistry*, 2019, no. 107, pp. 8–18.
13. Malikova I.N., Strakhovenko V.D., Ustinov M.T. Uranium and thorium contents in soils and bottom sediments of lake Bolshoye Yarovoye, western Siberia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, no. 211, 106048.
14. Nikolaeva I.V., Paleskiy S.V., Chirko O.S., Chernonozhkin S.M. Opredelenie osnovnykh i primesnykh elementov v silikatnykh porodakh metodom mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy posle splavleniya s LiBO₂ [Determination of major and trace elements in silicate rocks using inductively coupled plasma mass-spectrometry technique after fusion with LiBO₂]. *Analitika i kontrol*, 2012, vol. 16, no. 2, pp. 134–142.
15. Nozhkin A.D., Turkina O.M. *Geokhimiya granulitov kanskogo i sharyzhalgayskogo kompleksov* [Geochemistry of granulites of the kans and sharyzhalgay complexes]. Novosibirsk, OIGGM SB RAS Publ., 1993. 291 p.
16. Rene M. Alteration of granitoids and crystalline rocks and uranium mineralization in the Bor pluton area, Bohemian Massif, Czech Republic. *Ore Geology Reviews*, 2017, no. 81, pp. 188–200.
17. Zhang L., Chen Z., Wang F., Zhou T. Whole-rock and biotite geochemistry of granites from the Miao'ershan batholith, South China: Implications for the sources of the granite-hosted uranium ores. *Ore Geology Reviews*, 2021, no. 129, 103930.
18. Palmer M.R., Edmond J.M. Uranium in river water. *Cheochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, no. 57, pp. 4947–4955.
19. Windom H., Smith R., Niencheski F., Alexander C. Uranium in rivers and estuaries of globally diverse, smaller watersheds. *Marine Chemistry*, 2000, no. 68, pp. 307–321.
20. Gardner C.B., Carey A.E., Lyons W.B., Goldsmith S.T., McAdams B.C., Tierweiler A.M. Molybdenum, vanadium and uranium weathering in small mountainous rivers and rivers draining high-standing islands. *Cheochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, no. 219, pp. 22–43.
21. Isupov V.P., Ariunbileg S., Razvorotneva L.I., Lyakhov N.Z., Shvartsev S.L., Vladimirov A.G., Kolpakova M.N., Shatskaya S.S., Chupakhina L.E., Moroz E.N., Kuibida L.V. Geokhimicheskaya model nakopleniya urana v ozere Shaazgay-Nuur (Severo-Zapadnaya Mongolia) [Geochemical model of uranium accumulation of uranium in the Shaazgay-Nuur lake (Northwestern Mongolia)]. *Doklady Akademii Nauk*, 2012, vol. 447, no. 6, pp. 658–663.
22. Shin W., Oh J., Choung S., Cho B.-W., Lee K.-S., Yun U., Woo N.-C., Kim H.K. Distribution and potential health risk of groundwater uranium in Korea. *Chemosphere*, 2016, no. 163, pp. 108–115.
23. Papageorgiou F., McDermott F., Van Acken D. Uranium in groundwaters: Insights from the Leinster granite, SE Ireland. *Applied Geochemistry*, 2022, no. 139, 105236.
24. Pirmatov E.A., Dyusambaev S.A., Dusejbaev B.O., Zhakanbaev E.E., Vyatchennikov L.S., Sadyrbaeva G.A. Perspektivy podzemnogo skvazhinnogo vychshelachivaniya urana na mestorozhdenii Semizbay [Perspectives of underground well leaching of uranium on the Semizbay deposit]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy bulletin*, 2006, no. 11, pp. 246–254.
25. Takeno N. *Atlas of Eh-pH diagrams. Intercomparison of thermodynamic databases*. Tokyo, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Publ., 2005. 285 p.
26. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of underground waters. Theoretical, applied and ecological aspects]. 2nd ed. Moscow, TsentrLitNefteGaz Publ., 2012. 672 p.
27. Putilina V.S., Galitskaya I.V., Yuganova T.I. *Sorbtsionnyye protsessy pri zagryaznenii podzemnykh vod tyazhelymi metallami i radioaktivnymi elementami. Uran* [Sorption processes during contamination of underground waters by heavy metals and radioactive elements. Uranium]. Novosibirsk, GPNTB SB RAS Publ., 2014. 127 p.
28. Strakhovenko V.D., Gaskova O.L. Thermodynamic model of formation of carbonates and uranium mineral phases in lakes Namshi-nur and Tsagan-tyrm (Cisbaikalia). *Geology and geophysics*, 2018, vol. 59, no. 4, pp. 467–480. In Rus.

Received: 17 July 2022.

Reviewed: 26 September 2022.

Information about the authors

Alexander V. Karpov, junior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Olga L. Gaskova, Dr. Sc., leading researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Alexander G. Vladimirov, Dr. Sc., leading researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Irina Yu. Annikova, Cand. Sc., senior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Ekaterina N. Moroz, leading engineer, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

УДК 691.54:666.962

МОДИФИЦИРОВАНИЕ НЕАВТОКЛАВНОГО ПЕНОБЕТОНА ТОРФЯНОЙ ДОБАВКОЙ ТМТ600

Прищепа Инга Александровна¹,
ingaprishepa@mail.ru

Мостовщиков Андрей Владимирович^{1,2},
mostovshchikov@tsuab.ru

Саркисов Юрий Сергеевич¹,
sarkisov@tsuab.ru

¹ Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Изучено влияние термомодифицированной добавки на основе торфа ТМТ600 на свойства и структуру пенобетона неавтоклавного твердения. Предложена модель фрагмента структуры границы раздела фаз газ–твердое–жидкое и модель формирования пористой структуры рассматриваемой композиции. Выявлен механизм роли пенообразователя в процессе формирования пористой структуры пенобетона. Методами томографии показано соответствие реальной структуры пенобетона предложенным моделям, а также достижение однородности распределения пор по объему. Установлено, что в процессе гидратации после растворения тоберморита и этtringита происходит перезарядка частиц цемента, а следовательно, электростатический потенциал изменяется от положительных до отрицательных значений. При формировании пены массоперенос частиц осуществляется не только диффузионным, но и конвективным путем. Ускоренное перемещение частиц может осуществляться также за счет электростатического взаимодействия зарядов на поверхности пены и торфяной добавки. Геометрия структурных ячеек пены имеет вид многоугольников, состоящих преимущественно из шести- и пятиугольных граней. В результате происходящих процессов формируется сложная иерархическая структура, в которой каналы Плато–Гиббса в пене кальматируются (закупориваются), образуя более прочный скелет, и после гидратации цемента ввиду перезарядки поверхности последнего в конечном итоге формируются межпоровые перегородки повышенной прочности при одновременном равномерном распределении пор в структуре пенобетона. Разработанный стеновой материал обладает не только высокой прочностью, морозостойкостью, но и повышенными теплоизоляционными свойствами. Полученный с применением добавки ТМТ600 пенобетон полностью отвечает семи фундаментальным критериям современной концепции строительного материаловедения, таким как: технологическая доступность и эффективность, энергоресурсосбережение, экологическая безопасность и природная совместимость, экономическая целесообразность, этическая приемлемость применения на практике, эстетическая выразительность и социальная направленность.

Ключевые слова:

пенобетон, термомодифицированная торфяная добавка ТМТ600, кратность и стойкость пены, структурообразование, томография.

Введение

В условиях энергосберегающего вектора развития строительства и эксплуатации зданий и сооружений на первый план выходят такие стеновые строительные материалы и изделия, которые при минимальной себестоимости их производства позволяют сооружать эффективные по критерию тепло- и звукозащиты стеновые ограждающие конструкции. В то же время конструкция стены должна удовлетворять требованиям прочности и морозостойкости, надежности и долговечности. Немаловажным фактором является снижение общей нагрузки на фундамент за счет применения изделий с минимальной удельной массой, что благоприятно скажется на общей стоимости строительства.

Одним из перспективных материалов является пенобетон, который получил широкое распространение и востребованность по сравнению с классическими стеновыми материалами из-за простоты технологии производства, доступности сырьевой базы, относительно невысокой себестоимости и экологичности [1–4].

В настоящее время получение стеновых блоков пенобетона базируется на технологии автоклавирования, которая позволяет выпускать партии материала со стабильными и воспроизводимыми параметрами качества. Однако высокая энергоемкость, металлоемкость, экологическая безопасность, взрывоопасность, а также себестоимость готового продукта ограничивают применение автоклавных технологий в производстве пенобетона. В связи с этим возрастает спрос на производство пенобетона неавтоклавного твердения.

Формирование структуры неавтоклавного пенобетона на различных уровнях, несмотря на простоту технологии его изготовления, трудно поддается управлению. Это является следствием ряда технологических факторов: вероятность возникновения усадочных деформаций, замедление сроков начального структурообразования и т. п. Это затрудняет получение качественного конечного продукта стенового материала с заданными свойствами. Одним из путей решения этой проблемы, как это следует из научно-технической и

патентной литературы, является использование разнообразных модифицирующих добавок, включая нанодисперсные структуры различного природного происхождения. Как правило, эти добавки либо импортируются из-за рубежа, либо отличаются высокой стоимостью или усложненной технологией производства. К таким добавкам, безусловно, можно отнести торф [5, 6]. Исследованию торфов Томской области посвящен ряд работ, в которых показаны его функциональные свойства и перспективы применения в различных отраслях [7, 8]. Томская область является одним из наиболее богатых регионов России по месторождениям торфа [9–11]. Поэтому использование торфа в различных строительных технологиях как компонента строительных смесей или как основы для получения эффективных добавок является перспективным. В Томском государственном архитектурно-строительном университете на основании многолетних исследований разработаны эффективные добавки на основе термомодифицированного торфа, среди которых наибольшее распространения получила добавка ТМТ600 [12, 13]. Добавка ТМТ600 для регулирования свойств неавтоклавного пенобетона ранее не применялась.

Целью настоящей работы являлось исследование закономерностей влияния термомодифицированной торфяной добавки ТМТ600 на свойства пены и пенобетона неавтоклавного твердения.

Материалы и методы исследования

Для выполнения исследований использовали портландцемент Топкинского завода ЦЕМ I 42,5Н (ГОСТ 30515–2020), песок Кудровского месторождения Томской области, модуль крупности 1,8 (ГОСТ 8736-2014). В качестве пенообразующей добавки был выбран синтетический пенообразователь Бенотех ПБ-С (ГОСТ 24211-2008), представляющий собой смесь анионоактивных ПАВ со стабилизирующими и функциональными добавками. Для затворения смесей используется водопроводная вода, соответствующая требованиям ГОСТ 23732-2011. Для изготовления термомодифицированной торфяной добавки ТМТ600 был использован торф Гусевского месторождения, который предварительно подвергли термообработке при температуре 600 °С. Добавка ТМТ600 содержит более 90 % минеральной части, 10 % органической и относится к минерал-органической добавке [14]. Средний размер частиц добавки ТМТ600 составлял 42 ± 3 мкм, удельная поверхность $0,6 \text{ м}^2/\text{г}$. Элементный состав торфяной добавки представлен в основном кальцием, углеродом и алюминием (рис. 1, табл. 1). В то же время ТМТ600 представляет собой иерархическую структуру на различных масштабных уровнях, которая включается в себя и молекулярный, и надмолекулярные уровни.

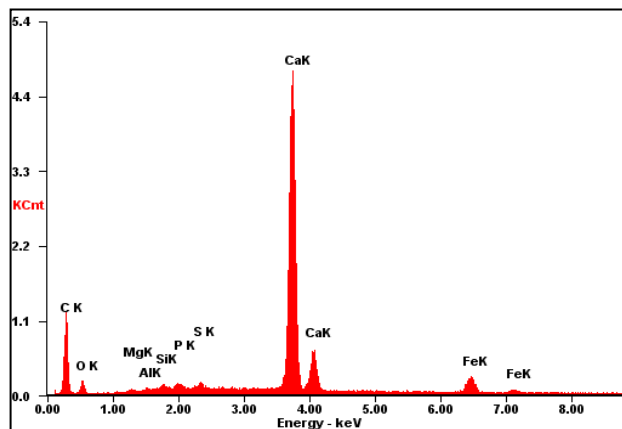
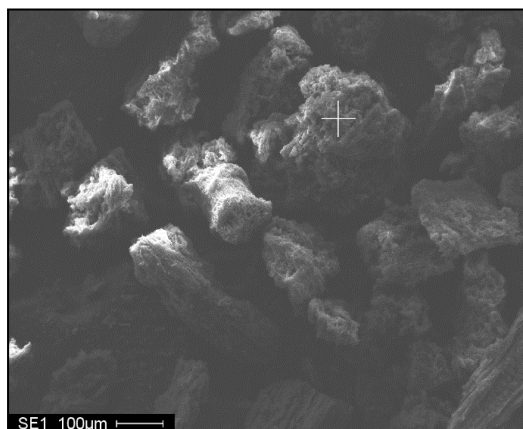


Рис. 1. Результаты исследования элементного состава модифицирующей добавки ТМТ600

Fig. 1. Results of the study of the elemental composition of the modifying additive TMT600

Таблица 1. Элементный состав модифицирующей добавки ТМТ600

Table 1. Elemental composition of the modifying additive TMT600

Элемент/Element	Мас. %/Wt. %	Ат. %/At. %
C	48,48	69,46
O	13,02	14,00
Mg	00,54	00,38
Al	00,46	00,29
Si	00,63	00,38
P	00,58	00,32
S	00,54	00,29
Ca	31,72	13,62
Fe	04,04	01,25

Нестабильное поведение пузырьков вызывает неравномерное распределение пор по размерам в пенобе-

тоне. Совместное действие выталкивающей силы, силы тяжести, давления раствора и внутреннего давления приводит к нестабильности пузырьков, когда они попадают в цементное тесто: чем меньше пузырь, тем заметнее нестабильность. Неустойчивое состояние в пузырьках приводит к непрерывному слиянию и росту пузырьков, что увеличивает их размер. Поведение пузырьков при слиянии становится более очевидным, когда используется большее количество пены.

В качестве рабочей гипотезы было сделано предположение, что введение добавки ТМТ600 в пенный раствор позволит модифицировать поверхность раздела фаз газ–жидкость и получить стабильные пены для производства пенобетона. Возникновение эффекта разделения между пузырьками

и цементно-песчаным раствором происходит под действием различных сил [15], состоящих из силы Стокса (F_c), силы тяжести (F_T), внутреннего давления пузырька ($P_{вн}$) и поверхностного натяжения ($F_{пн}$), индуцированных эффектом поверхностно-

активного вещества, а также силы Архимеда (F_A), как показано на рис. 2.

В настоящей работе была предложена вероятная модель формирования структуры неавтоклавного пенобетона с добавкой ТМТ600 (рис. 3).

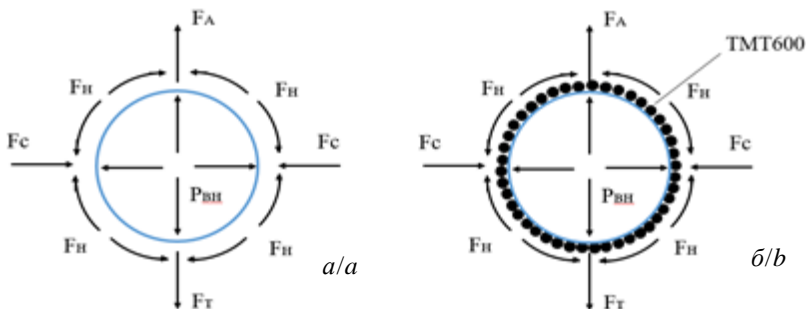


Рис. 2. Силы, действующие на пузырек (а) и пузырек, стабилизированный добавкой ТМТ600 (б)
 Fig. 2. Forces acting on a normal bubble (a) and addition of TMT600 stabilized bubble (b)

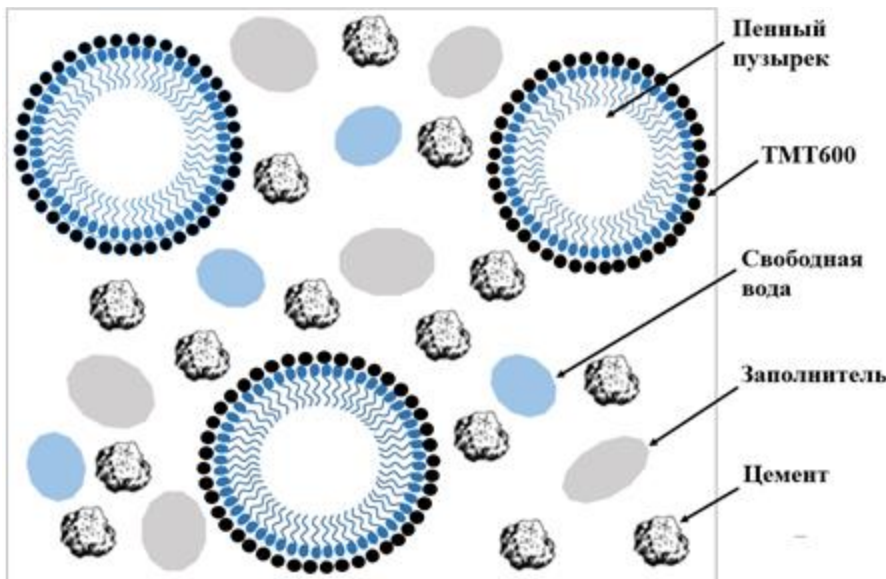


Рис. 3. Вероятная модель фрагмента структуры пенобетона с добавкой ТМТ600 на границе раздела фаз газ–твердое–жидкость
 Fig. 3. Probable model of a fragment of the structure of foam concrete with the addition of TMT600 at the gas–solid–liquid interface

Как видно из рис. 3, пенообразователь формирует каналы Плато–Гиббса, которые кальматируются торфяной добавкой, что обеспечивает в дальнейшем усиление адгезионных свойств цементно-песчаной матрицы.

Результаты и их обсуждение

Добавка ТМТ600 по своим физико-химическим свойствам на 80 % представляет собой неполярный адсорбент и на 20 % полярный адсорбент. В этой связи, согласно правилу полярности фаз Ребиндера П.А. [16], вода будет адсорбироваться на ТМТ600 в основном неполярным водородом, а на полярных оксидах кальция, кремния, алюминия, железа, напротив, – гидроксильной группой. При добавлении пенообразователя, в зависимости от заряда функциональных групп, его взаимодействие с адсорбентами определя-

ется правилом Кёна [16]: эффективность пенообразователя будет максимальной при выполнении условия: $\epsilon_B > \epsilon_{ПВ} > \epsilon_C$.

В связи с этим пузырек воздуха пены, который заряжен отрицательно, наиболее сильно будет притягиваться к поверхности частиц адсорбента ТМТ600 и значительно слабее к поверхности цемента, частицы которого в воде заряжены отрицательно. Этот результат косвенно подтверждается реограммами, из которых следует, что добавка ТМТ600, введенная в цементную систему, меняет реологию исследуемой системы, понижая ее тиксотропность и повышая реопексию (рис. 4).

В процессе гидратации после растворения тоберморита и этtringита происходит перезарядка частиц цемента, а, следовательно, электрокинетический потенциал изменяется от положительных значений до

отрицательных [17]. В результате происходящих процессов формируется сложная иерархическая структура, в которой каналы Плато–Гиббса в пене кальматируются (закупориваются), образуя более прочный скелет, и после гидратации цемента ввиду перезарядки поверхности последнего в конечном итоге формируется межпоровая перегородка повышенной прочности при одновременном равномерном распределении пор в структуре пенобетона. Влияние торфяной добавки на кратность и стойкость пены приведено на рис. 5.

Из анализа данных, представленных на рис. 5, следует, что при увеличении добавки ТМТ600 вплоть до 2 % в водном растворе пенообразователя наблюдается возрастание стойкости пены. Наибольший эффект по стабильности (стойкости) наблюдается у пены с 1,5–2,5 % торфяной добавки ТМТ600. Полученные результаты свидетельствуют о том, что введение в раствор пены добавки ТМТ600 приводит к улучшению свойств пены за счет инкапсуляции частиц торфа на поверхности пены (рис. 6). Микрочастицы добавки ТМТ600 мигрируют по границам раздела фаз пены с образованием агрегатов достаточно крупных разме-

ров, особенно в узлах ребер Плато, что приводит к повышению ее устойчивости, что хорошо согласуется с литературными данными [18].

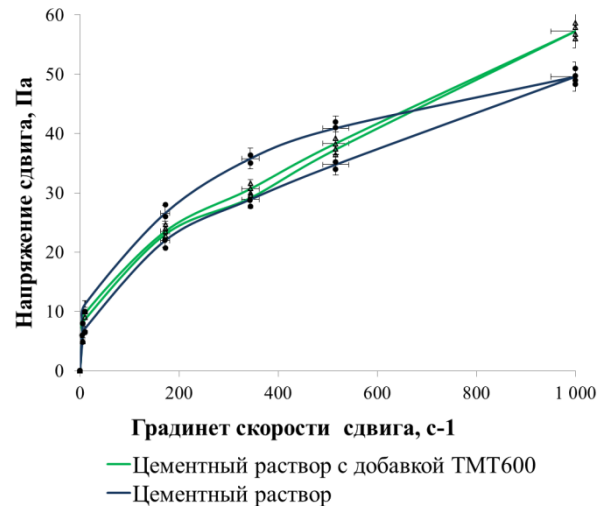


Рис. 4. Реологические свойства цементного раствора
 Fig. 4. Rheological properties of cement slurry

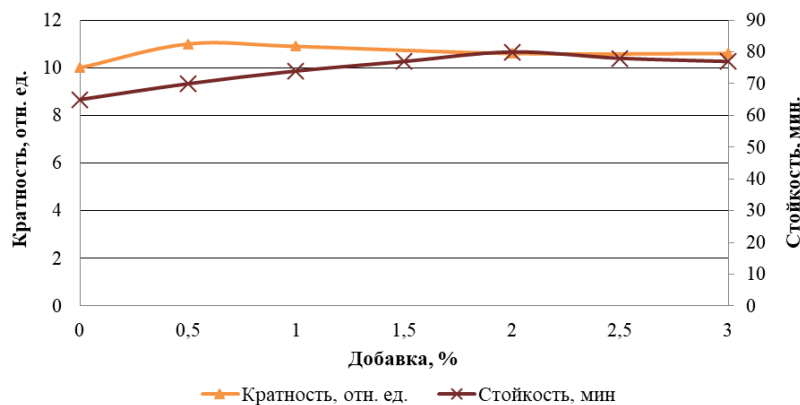
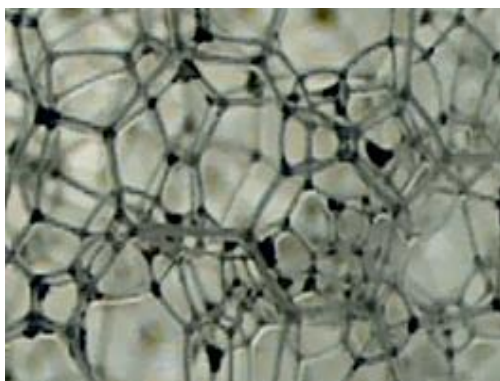
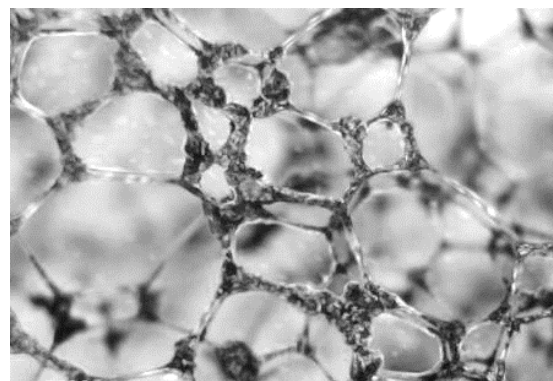


Рис. 5. Влияние торфяной добавки ТМТ600 на кратность и стойкость пены
 Fig. 5. Influence of peat additive TMT600 on the expansion rate and foam stability



а/а



б/б

Рис. 6. Распределение добавки ТМТ600 по каналам Плато–Гиббса: а) 5 минут после приготовления пены; б) 60 минут после приготовления пены

Fig. 6. TMT600 additive distribution through the Plateau–Gibbs channels: a) 5 minutes after foam preparation; b) 60 minutes after foam preparation

Массоперенос частиц осуществляется не только диффузионным, но и конвективным путем при фор-

мировании пены. Ускоренное перемещение частиц может осуществляться также за счет электростатиче-

ского взаимодействия зарядов на поверхности пены и торфяной добавки. Геометрия структурных ячеек пены имеет вид многоугольников, состоящих преимущественно из шести- и пятиугольников. С течением времени в результате проявления эффекта синергизма и взаимодействия анионоактивных пенообразующих ПАВ происходит уплотнение пространственной структурной сетки пены, сопровождаемое отделением жидкости через каналы Плато–Гиббса. Происходит это из-за схлопывания более нестабильных пузырьков и путем формирования новых связей между стабильными пузырьками. Добавка ТМТ600 увлекается жидкостью и распределяется в узлах, уплотняя микроструктуру и повышая стойкость пены.

Свойства пенобетона неавтоклавного твердения определяются его фазовым составом и структурой. Следовательно, моделирование структур пенобетона неавтоклавного твердения с учетом фазовых превращений их составляющих является основой для последующего прогноза свойств пенобетона и системного подхода к получению пенобетона с добавкой ТМТ600.

Частицы цемента имеют противоположный заряд с пенообразователем, а угол смачивания частиц цемента после реакции с пенообразователем увеличивается [15], поэтому частицы цемента легко поглощаются пузырьками при смешивании цементного раствора с готовыми пенами. В цементном растворе, прилегающем к пузырькам, снижается концентрация частиц цемента. В затвердевшем пенобетоне формируется оболочечная структура, окруженная воздушными порами пенобетона, отдаленного от цементной матрицы на определенное расстояние. При гидратации цемента ионы Са диффундируют в жидкую оболочку (межчастичный зазор). Цемент абсорбирует пенообразователь, и ионы Са, осажаясь на границе газ–жидкость, препятствуют ионам мигрировать в сторону границы соприкосновения с атмосферой воздуха. Схема (рис. 7) рассматриваемых процессов позволила объяснить поровую структуру пенобетона, которая хорошо согласуется с литературными данными [15–20].

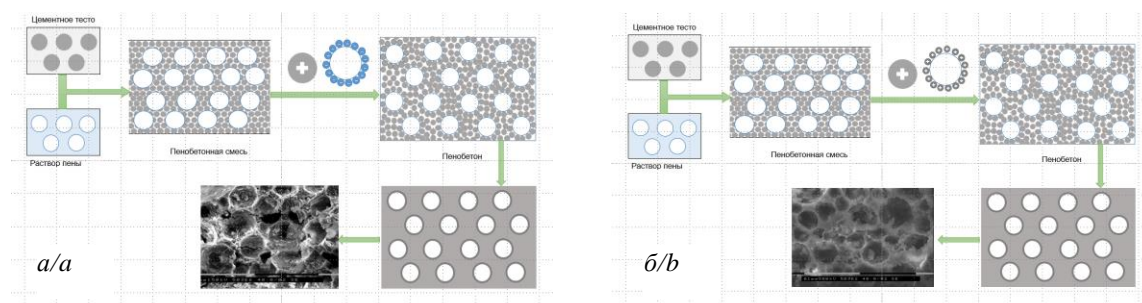


Рис. 7. Схема пористой структуры пенобетона, подготовленного с анионным пенообразователем (а) и анионным пенообразователем и добавкой ТМТ600 (б)

Fig. 7. Schematic formation of the porous structure of foam concrete with anionic surfactant (a) and with anionic surfactant with additive TMT600 (b)

Согласно рис. 7, основным визуальным признаком качества образцов пенобетона с добавками является более однородная структура: поры равномерно заполняют все пространство. В образцах пенобетона без введения добавки поры расположены хаотично, а также имеются поры, основания некоторых из них с трещинами, целостность межпоровых перегородок нарушена, что является нежелательным для структуры теплоизоляционных материалов.

Традиционным способом исследования структуры пенобетонов и других пенных материалов является метод последовательного среза слоев с последующим анализом подготовленной поверхности визуальным-измерительным методом или с помощью обработки цифровых фотографических изображений специализированными программами. Основными недостатками указанного выше способа является его низкая производительность, образование облака пылевидных частиц, искажение структуры среза испытуемых образцов механическим воздействием на материал. Современным подходом является использование компьютерной томографии, позволяющей оценивать структуру образцов горных пород и строительных материалов, в том числе и пенобетонов [19, 20]. Совокупный анализ изображений сечений (рис. 8)

испытанных образцов позволил сделать выводы о меньших размерах пор пенобетона с ТМТ600, повышенной однородности структуры по распределению пор с малым количеством уплотненных структур с размером, превышающим 0,3 мм. Эти выводы подтверждают эффективность предлагаемой в статье технологии изготовления неавтоклавного пенобетона с добавкой ТМТ600.

Совершенствование качества пенобетонов в строительстве обуславливает необходимость получения информации о таких параметрах, как линейные размеры пор, площади их сечений и объемы [19, 20]. Указанные параметры являются случайными величинами, причём зависимыми друг от друга. Случайность этих параметров вызывает потребность в получении информации и о характерах их распределений. Указанная информация является необходимой для совершенствования технологий изготовления пенобетона с высокими потребительскими свойствами. Потребительские свойства пенобетона тем выше, чем меньше среднее значение и рассеяние размера пор (площади сечения, объема). Общая пористость и характер распределения пор по размерам определяют тепло- и звукоизоляционные свойства пенобетона. Конструктивные свойства пенобетона зависят от толщины слоя затвердевшего цементного теста

[21–24], которое разделяет соседние поры. Такая толщина также является случайной величиной, которая характеризуется своей плотностью распределения.

На рис. 9 приведены выборочные значения плотности распределения эффективного диаметра пор для испытанных образцов пенобетона.

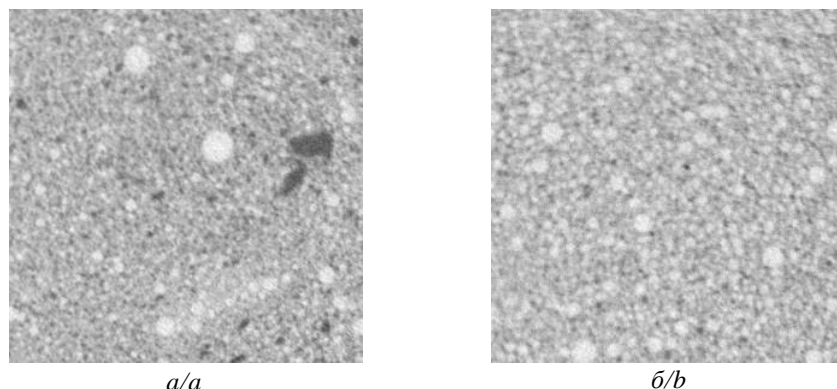


Рис. 8. Реконструированные изображения сечений: а) пенобетон; б) пенобетон с добавкой ТМТ600
 Fig. 8. XCT reconstructions of foam concrete structure: a) foam concrete; b) foam concrete with additive TMT600

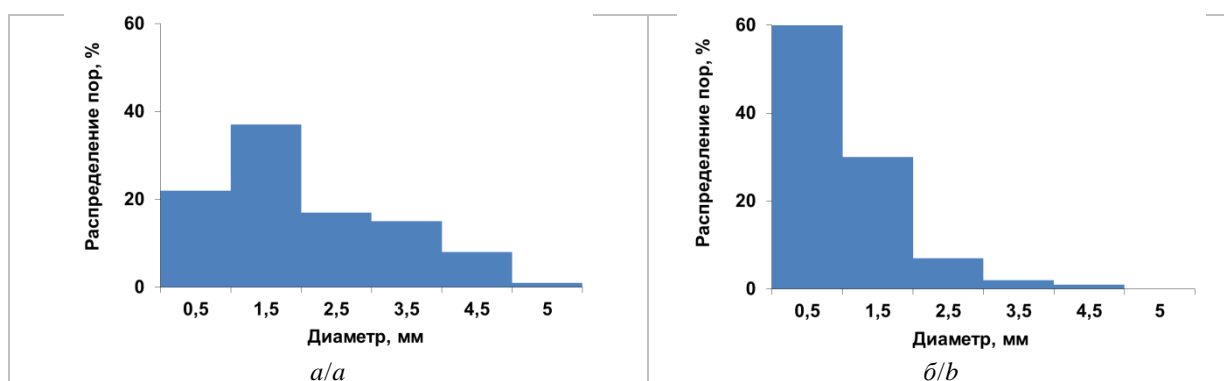


Рис. 9. Распределение пор по диаметру: а) пенобетон; б) пенобетон с добавкой ТМТ600
 Fig. 9. Pore size distribution: a) foam concrete; b) foam concrete with additive TMT600

Таблица 3. Физико-механические показатели пенобетона с добавкой ТМТ600

Table 3. Physical and mechanical properties of foam concrete with additive TMT600

Показатели Indicators	Пенобетон с добавкой ТМТ 600 Foam concrete with additive TMT 600
Марка по средней плотности Average density grade	D700
Класс по прочности на сжатие Compressive strength class	B2,5
Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/м °С Thermal conductivity coefficient in dry state, W/m °C	0,10
Марка по морозостойкости Frost resistance grade	F75
Водопоглощение по массе Water absorption by mass, %	34,5
Среднее значение по плотности, кг/м ³ Average density, kg/m ³	633
Среднее значение по прочности, МПа Average strength value, MPa	3,58
Усадка при высыхании, мм/м Drying shrinkage, mm/m	1,7

Из анализа гистограмм, приведённых на рис. 9, следует вывод, что среднее значение диаметра пор

существенно меньше и соответствующая плотность распределения значительно уже, чем в образцах пенобетона с добавкой ТМТ600.

В табл. 2 приведены сводные данные физико-механических и эксплуатационных показателей пенобетона в 28-суточном возрасте с добавкой ТМТ600.

Приведенные в табл. 3 данные свидетельствуют о соответствии полученного материала современным технико-экономическим требованиям. Изготовленные составы пенобетона с добавкой ТМТ600 обладают рядом преимуществ, таких как снижение коэффициента теплопроводности и усадки при высыхании, а также предела прочности при сжатии.

Заключение

- В пенах с добавкой ТМТ600 стойкость увеличивается в 1,8 раза, это обусловлено реализацией механизма эмульгирования твердыми веществами, а именно, утолщением пленки на поверхности пенного пузырька за счет адсорбции твердых дисперсных частиц на поверхности раздела фаз и обволакиванием воздушного пузырька, тем самым препятствуя разрушению пены. Избыток не сорбируемой на поверхности пузырька твердой фазы вследствие её высокой концентрации обес-

печивает закупорку свободного пространства (каналов Плато–Гиббса) с формированием плотноупакованной структуры твердых частиц в межпузырьковом пространстве ввиду их полидисперсности. Всё это обеспечивает пространственную и временную стабилизацию пенной структуры.

- Установлено, что введение в пенобетонную смесь добавки ТМТ600 позволяет получить однородную мелкопористую структуру пенобетона с размерами пор 0,5 мм до 60 %, что приводит к уменьшению теплопроводности на 34,8 % (0,1 Вт/м·°С) и получению марки по морозостойкости F75 при одновременном сохранении класса по прочности пенобетона до B2,5 (с сохранением марки D700).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винокурова О.В., Баранова А.А. Влияние пен различной кратности на формирование структуры теплоизоляционного пенобетона // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17. – № 1. – С. 50–59. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.50-59.
2. Homogeneous pore distribution in foam concrete by two-stage foaming / R.E. Lukpanov, D.S. Dyussebinov, Ye.B. Utegov, D.O. Bazarbayev, D.V. Tsygulyov, S.B. Yenkebayev et al. // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – № 103 (3). – P. 10313. DOI: 10.34910/MCE.103.13.
3. Hao Y., Yang G., Liang K. Development of fly ash and slag based high-strength alkali-activated foam concrete // Cement and Concrete Composites. – 2022. – V. 128. – P. 104447. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104447
4. Кудяков А.И., Прищепа И.А., Осипов С.П. Цементный пенобетон неавтоклавного твердения с термомодифицированной торфяной добавкой // Строительные материалы. – 2022. – № 1–2. – С. 40–49. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-40-49.
5. Кузнецова И.Н., Рашупкина М.А., Жуков С.В. Технология пенобетона на основе торфа // Вестник СибАДИ. – 2014. – № 4 (38). – С. 72–76.
6. Ляхевич Г.Д., Ляхевич А.Г., Ортнер Д.В. Технология и эффективность использования торфяных зол в цементобетоне // Наука и техника. – 2015. – № 2. – С. 16–23.
7. Формирования структуры пенобетона с термомодифицированной торфяной добавкой в ранние сроки твердения / И.А. Прищепа, А.И. Кудяков, Ю.С. Саркисов и др. // Вестник Томского государственного университета. Химия. – 2020. – № 18. – С. 35–46. DOI: 10.17223/24135542/18/4.
8. Торфо-содержащие композиции на основе магнезиального вяжущего / Н.А. Митина, В.А. Лотов, М.А. Ковалева, Н.О. Копаница // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2018. – Т. 61. – № 8. – С. 81–88. DOI: 10.6060/ivkkt.20186108.5729.
9. Марков М.Л., Потапова Т.М., Задонская О.В. Региональные особенности эколого-геохимического состояния поверхностных водных объектов в таежной зоне Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 7–15. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2589.
10. Архипов В.С. Распределение химических элементов в геохимически сопряжённых болотных ландшафтах таежной зоны Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 10. – С. 32–40.
11. Вещественный состав торфов Тимирязевского болота (Томск, западная Сибирь) / О.Г. Савичев, М.А. Рудмин, А.К. Мазуров и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 51–61. DOI: 10.18799/24131830/2021/03/3100.
12. Способ получения модифицирующей добавки для цементной композиции и цементная композиция: пат. Рос. Федерация, № 2576766, заявл. 21.01.2015; опубл. 10.03.2016. Бюл. № 7. – 7 с.
13. Foam concrete of increased strength with the thermomodified peat additives / A.I. Kudyakov, N.O. Kopanitsa, A.V. Kasatkina, I.A. Prischepa, J.S. Sarkisov // IOP Conference Series: Materials

- Пенобетон с добавкой ТМТ600 полностью отвечает семи фундаментальным критериям современной концепции строительного материаловедения, таким как: технологическая доступность и эффективность, энегоресурсосбережение, экологическая безопасность и природная совместимость, экономическая целесообразность, этическая приемлемость применения на практике, эстетическая выразительность и социальная направленность.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект FEMN-2022-0001.

- Science and Engineering. Advanced Materials in Construction and Engineering. – Tomsk, TSUAB, 2015. DOI: 10.1088/1757-899X/71/1/012012.
14. Наномодифицирующая добавка для регулирования триботехнических свойств узлов и агрегатов транспортных машин / В.В. Ионов, С.А. Ларионов, Ю.С. Саркисов и др. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 6 (59). – С. 160–169.
 15. Foam concrete: a state-of-the-art and state-of-the-practice review / Yanbin Fu, Xiuling Wang, Lixin Wang, Yunpeng Li // Advances in Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 2020. – Article ID 6153602. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/6153602> (дата обращения 15.08.2022).
 16. Арсланов В.В. Нанотехнология. Коллоидная и супрамолекулярная химия: Энциклопедический справочник. Более 1000 словарных статей, упорядоченных по английским эквивалентам. – М.: Ленанд, 2019. – 400 с.
 17. Лотов В.А. О взаимодействии частиц цемента с водой или вариант механизма процессов гидратации и твердения цемента // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 99–110.
 18. Лотов В.А., Сударев Е.А. Влияние хлористого натрия и углекислого кальция на реологические характеристики и синтетических пенообразователей в производстве пенобетона // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 3. – С. 50–52.
 19. Influence of foaming agent on cement and foam concrete / Li Hou, Jun Li, Zhongyuan Lu, Yunhui Niu // Construction and Building Materials. – 2021. – V. 280. – 122399. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122399> (дата обращения 15.08.2022).
 20. The effects of surfactants on properties of lightweight concrete foam / A. Kashani, T.D. Ngo, T.N. Nguyen, A. Haji mohammadi, S. Sinaie, P. Mendis // Magazine of Concrete Research. – 2020. – V. 72. – P. 163–172.
 21. An analysis of foamed concrete pore structure of railway roadbed based on X-ray computed tomography / Yuzhu Guo, Xudong Chen, Bo Chen, Rongkun Wen, Peng Wu // Construction and Building Materials. – 2021. – V. 273. – 121773. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121773> (дата обращения 15.08.2022).
 22. Компьютерная томография пенобетона / С.П. Осипов, И.А. Прищепа, А.И. Кудяков и др. // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 2 (38). – С. 146–152. – DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-146-152.
 23. Relation between density and compressive strength of foamed concrete / R. Othman, R.P. Jaya, K. Muthusamy, M. Sulaiman, Y. Duraisamy, M.M.A.B. Abdullah, A. Przybył, W. Sochacki, T. Skrzypczak, P. Vizireanu et al. // Materials. – 2021. – vol. 14. – 2967.
 24. Pore characteristics and their effects on the material properties of foamed concrete evaluated using micro-CT images and numerical approaches / S.Y. Chung, C. Lehmann, M. Abd Elrahman, D. Stephan // Applied Sciences. – 2017. – V. 7. – № 550. – P. 1–19.

*Поступила: 14.09.2022 г.
Дата рецензирования: 09.12.2022 г.*

Информация об авторах

Прищепа И.А., старший преподаватель кафедры строительных материалов и технологий Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Мостовщиков А.В., доктор технических наук, директор научно-исследовательского института строительных материалов и технологий Томского государственного архитектурно-строительного университета; профессор отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Саркисов Ю.С., доктор технических наук, профессор кафедры физики, химии и теоретической механики Томского государственного архитектурно-строительного университета.

UDC 691.54:666.962

MODIFICATION OF NON-AUTOCLAVED FOAM CONCRETE WITH PEAT ADDITIVE TMT600Inga A. Prishchepa¹,
ingaprishepa@mail.ruAndrei V. Mostovshchikov^{1,2},
mostovshchikov@tsuab.ruYuri S. Sarkisov¹,
sarkisov@tsuab.ru¹ Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya square, Tomsk 634003, Russia.² National Research Tomsk Polytechnic university,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The authors have studied the effect of a thermally modified additive based on peat TMT600 on the properties and structure of foam concrete of non-autoclave hardening and proposed a model of a fragment of the structure of the gas–solid–liquid interface and a model for the formation of a porous structure of foam concrete of non-autoclave hardening. The paper reveals the mechanism of the role of the foaming agent in formation of the porous structure of foam concrete. Tomography methods have shown that the real structure of foam concrete corresponds to the proposed models, as well as the achievement of a uniform distribution of pores by volume. It was established that in hydration after the dissolution of tobermorite and ettringite, the cement particles are recharged, and, consequently, the electrokinetic potential changes from positive to negative values. The mass transfer of particles is carried out not only by diffusion, but also by convection during foam formation. The accelerated movement of particles can also be carried out due to the electrostatic interaction of charges both on the surface of the foam and the peat additive. The geometry of the structural cells of the foam has the form of polygons, consisting mainly of hexagons and pentagons. As a result of the ongoing processes, a complex hierarchical structure is formed, in which the Plateau–Gibbs channels in the foam are calmed (clogged), forming a stronger skeleton, and after cement hydration, due to the recharging of the surface of the latter, an interpore partition of increased strength is eventually formed with a simultaneous uniform distribution of pores in foam concrete structure. The developed wall material has not only high strength, frost resistance, but also increased thermal insulation properties. The foam concrete obtained with the use of the TMT600 additive fully meets the seven fundamental criteria of the modern concept of building materials science, such as: technological availability and efficiency, energy and resource saving, environmental safety and natural compatibility, economic feasibility, ethical acceptability of practical application, aesthetic expressiveness and social orientation.

Key words:

foam concrete, thermally modified peat additive TMT600, foam expansion and stability, structure formation, tomography.

The research was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project FEMN-2022-0001.

REFERENCES

- Vinokurova O.V., Baranova A.A. The influence of foams, having different expansion ratios, on the structuration of thermal insulation foam concrete. *Monthly Journal on Construction and Architecture*, 2022, vol. 17 (1), pp. 50–59. In Rus. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.50-59
- Lukpanov R.E., Dyusseminov D.S., Utepov Ye.B., Bazarbayev D.O., Tsygulyov D.V., Yenkebayev S.B. Homogeneous pore distribution in foam concrete by two-stage foaming. *Magazine of Civil Engineering*, 2021, no. 103 (3), pp. 10313. DOI: 10.34910/MCE.103.13.
- Hao Y., Yang G., Liang K. Development of fly ash and slag based high-strength alkali-activated foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2022, vol. 128, pp. 104447. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104447.
- Kudyakov A.I., Prishchepa I.A., Osipov S.P. Non-autoclaved cement foam concrete with thermal modified peat additive. *Construction Materials*, 2022, no. 1–2, pp. 40–49. In Rus.
- Kuznetsova I.N., Rashchupkina M.A., Zhukov S.V. Technology of foamed concrete on the basis of peat. *Bulletin of SibADI*, 2014, vol. 38, no. 4, pp. 72–76. In Rus.
- Liakhevich G.D., Liakhevich A.G., Ortner D.V. Technology and efficiency of peat ash usage in cement concrete. *Science & Technique*, 2015, vol. 2, pp. 16–23. In Rus.
- Prishchepa I.A., Kudyakov A.I., Sarkisov Y.S., Gorlenko N.P., Zhuravlev V.A., Suslyayev V.I., Ugodenko D.O. Formation of foam concrete structure with thermally modified peat additive in early terms of hardening. *Bulletin of Tomsk State University. Chemistry*, 2020, no. 18, pp. 35–46. In Rus. DOI: 10/17223/24135542/18/4.
- Mitina N.A., Lotov V.A., Kovaleva M.A., Kopanitsa N.O. Peat-containing composition containing magnesia binder. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*, 2018, vol. 61, no. 8, pp. 81–88. In Rus.
- Markov, M.L. Regional features of ecological geochemical condition of surface water bodies in taiga zone of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 7–15. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2589.
- Arkipov V.S. Distribution of chemical elements in geochemically conjugated wetland landscapes of the taiga zone in Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 10, pp. 32–40. In Rus.
- Savichev O.G., Rudmin M.A., Mazurov A.K., Fedchenko A.S., Ruban A.S., Dauletova A.B. Material composition of peats of the Timiryazev Mire (Tomsk, Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 51–61. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/3/3101
- Kopanitsa N.O., Sarkisov Y.S., Demyanenko O.V., Kasatkina A.V., Gorlenko N.P. *Sposob polucheniya modifitsiruyushchey dobavki dlya tsementnoy kompozitsii i tsementnaya kompozitsiya* [A method for obtaining a modifying additive for a cement composition and a cement composition]. Patent RF, no. 2015101778, 2016.

13. Kudyakov A.I., Kopanitsa N.O., Kasatkina A.V., Prishchepa I.A., Sarkisov Y.S. Foam concrete of increased strength with the thermomodified peat additives. *Advanced Materials in Construction and Engineering International Scientific Conference of Young Scientists: Advanced Materials in Construction and Engineering, TSUAB 2014*. Tomsk, Tomsk State University of Architecture and Building Publ., 2015. pp. 012012.
14. Ionov V.V., Larionov S.A., Sarkisov Y.S., Kopanitsa N.O., Gorshkova A.V., Gorlenko N.P., Belyaev S.A. Nano-modifier for tribological properties of machine components. *Vestnik of Tomsk state university of architecture and building*, 2016, vol. 6, pp. 160–169. In Rus.
15. Yanbin Fu, Xiuling Wang, Lixin Wang, Yunpeng Li. Foam concrete: a state-of-the-art and state-of-the-practice review. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 2020, Article ID 6153602. Available at: <https://doi.org/10.1155/2020/6153602> (accessed 15 August 2022).
16. Arslanov V.V. *Nanotechnologiya. Kolloidnaya i supramolekulyarnaya khimiya: entsiklopedicheskiy spravochnik. Bolee 1000 slovarnykh statey, uporyadochennykh po angliyskim ekvivalentam* [Colloidal and supramolecular chemistry: encyclopedic handbook. More than 1000 entries sorted by English equivalents]. Moscow, Lenand Publ., 2019. 400 p.
17. Lotov V.A. Interaction of cement particles with water or mechanism of hydration and hardening of cement. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 99–110. In Rus.
18. Lotov V.A., Sudarev E.A. Effect of sodium chloride and calcium carbonate on the rheological characteristics of synthetic foaming agents in the production of foam concrete. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 3, pp. 50–52. In Rus.
19. Li Hou, Jun Li, Zhongyuan Lu, Yunhui Niu. Influence of foaming agent on cement and foam concrete. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 280, 122399. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122399> (accessed 15 August 2022).
20. Kashani A., Ngo T.D., Nguyen T.N., Hajimohammadi A., Sinaie S., Mendis P. The effects of surfactants on properties of lightweight concrete foam. *Magazine of Concrete Research*, 2020, vol. 72, pp. 163–172.
21. Yuzhu Guo, Xudong Chen, Bo Chen, Rongkun Wen, Peng Wu. Analysis of foamed concrete pore structure of railway roadbed based on X-ray computed tomography. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 273, 121773. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121773> (accessed 15 August 2022).
22. Osipov S.P., Prishchepa I.A., Kudyakov A.I., Batranin A.V., Osipov O.S. Computer tomography of foam concrete. *Systems. Methods. Technologies*, 2018, vol. 38, no. 2, pp. 146–152. In Rus.
23. Othman R., Jaya R.P., Muthusamy K., Sulaiman M., Duraisamy Y., Abdullah M.M.A.B., Przybył A., Sochacki W., Skrzypczak T., Vizureanu P. Relation between density and compressive strength of foamed concrete. *Materials*, 2021, vol. 14, 2967.
24. Chung S.Y., Lehmann C., Abd Elrahman M., Stephan D. Pore characteristics and their effects on the material properties of foamed concrete evaluated using micro-CT images and numerical approaches. *Applied Sciences*, 2017, vol. 7, no. 550, pp. 1–19.

Received: 14 September 2022.

Reviewed 9 December 2022.

Information about the authors

Inga A. Prishchepa, senior lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building.

Andrei V. Mostovshchikov, Dr. Sc., director of the Research Institute of Building Materials and Technologies, Tomsk State University of Architecture and Building; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yuri S. Sarkisov, Dr. Sc., professor, Tomsk State University of Architecture and Building.

УДК 621.642.84

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДЫХАТЕЛЬНЫХ КЛАПАНОВ ПРИ ТЕОРЕТИЧЕСКИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ ИХ СРАБАТЫВАНИЯ

Левитин Роман Евгеньевич¹,
746636@mail.ru

Цыцельская Вероника Алексеевна¹,
tsyselskayaveronika@gmail.com

¹ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Актуальность. Статья посвящена проблеме потерь нефти и нефтепродуктов при эксплуатации резервуарных парков, наличие которых затрагивает экономические и экологические аспекты рационального использования ресурсов. Для сокращения выбросов углеводородов на предприятиях на данный момент используют различные технологические средства. Достигнутый эффект от применения существующих и разрабатываемых способов по борьбе с потерями определяется использованием специализированных методик, которые являются несовершенными. Поэтому возможность достоверной оценки способов сокращения потерь является одной из основных задач при эксплуатации резервуарных парков и правильного выбора использования технологических средств их оснастки для установления действительно достигаемых выбросов.

Цель: определить эффективность сокращения выбросов путем хранения нефти под избыточным давлением как действенного способа.

Объект: резервуар вертикальный стальной номинальным объемом 10000 м³, конструкция которого способна выдерживать различные нагрузки, и дыхательная арматура с возможностью настройки на широкий диапазон давлений, в том числе значительного превышающий расчетный интервал давлений для реальных резервуаров вертикальных стальных, установленных на данный момент.

Методы: идеально-газовое приближение в рамках термодинамического подхода.

Результаты. Описаны результаты проведенного авторами исследования, указывающие, что настройка дыхательных клапанов на большее избыточное давление срабатывания приводит к более сложной зависимости потерь от производимых дыханий в резервуаре, т. е. потери от «малых» дыханий могут не иметь прямой корреляции с увеличением давления срабатывания клапана. Установлено, что при теоретически высоких давлениях срабатывания дыхательной арматуры в диапазоне от 9,13 до 670,88 кПа может наблюдаться рост потерь от производимых «малых» дыханий в 7,25 раз, что указывает на необходимость новых технологий и способов, способных исключить выбросы паровоздушной смеси.

Ключевые слова:

паровоздушная смесь, потери смеси, резервуар, эффективность, дыхательный клапан, давление срабатывания, нефть, нефтепродукты, сокращение потерь, «большие» дыхания, «малые» дыхания, газовое пространство.

Введение

На данный момент проблема сокращения потерь нефти и нефтепродуктов является одним из важнейших направлений в области ресурсосбережения топливно-энергетического сырья и развития экономики компаний нефтяной промышленности [1, 2].

Способность нефти и нефтепродуктов к испарению определяет одни из основных причин потерь легких фракций углеводородов при их хранении [3–6]. Большое влияние на величину потерь имеют производственные операции заполнения и опорожнения резервуаров, а также изменения условий окружающей среды. Высокая испаряемость большинства сортов нефти, повышение температуры газового пространства и понижение атмосферного давления приводят к возникновению «малых» дыханий в резервуаре [7]. «Большие» дыхания осуществляются при технологических процессах слива и налива нефтепродуктов, в результате которых происходит вытеснение паровоздушной смеси в атмосферу или поступление воздуха через дыхательную арматуру [8, 9].

Для повышения эффективности работы предприятий транспортной инфраструктуры нефтяной отрасли в области сокращения выбросов углеводородов учеными [10–14] производится поиск и разработка реше-

ний оснастки объектов хранения и сбыта нефти и нефтепродуктов более совершенными технологическими средствами [15–18]. Для доказательства ответственности внедрения новых разработок относительно существующих стоят проблемы использования методик расчета с невысокой степенью достоверности, нуждающихся в совершенствовании, а также проблемы оценки эффективности применения существующих способов [19–22].

Одним из эффективных способов уменьшения выбросов считается хранение нефти и нефтепродуктов под избыточным давлением. С целью сокращения потерь в этом методе резервуар конструктивно рассчитывают для работы под избыточным давлением, что, согласно [23], предотвращает потери от «малых» и значительно снижает потери от «больших» дыханий.

В данной статье рассматривается теоретическая эффективность применения дыхательных клапанов, используемых для регулирования избыточного и вакуумметрического давления внутри резервуаров при таких условиях, в которых резервуар обладает прочностью выдерживать различные рабочие нагрузки, а потери паровоздушной смеси определяются только настройкой срабатывания клапанов на различный диапазон значений. Произведенный авторами

расчет учитывает влияние колебаний температуры газового пространства резервуара и атмосферного давления.

Объект и методы исследования

Для выявления эффективности хранения нефтепродуктов под высоким избыточным давлением как действенного способа снижения выбросов нефтепродуктов авторами была проведена оценка потерь паровоздушной смеси от производимых дыханий в резервуаре во время его эксплуатации с учетом возможности работы дыхательных клапанов при различных давлениях их срабатывания. Под различными давлениями срабатывания подразумевается настройка дыхательной арматуры на любые избыточные и вакуумметрические давления, которые могут значительно превышать рабочие (расчетные) давления, установленные на данный момент на резервуарах для хранения нефти и нефтепродуктов.

Расчет произведен для резервуара типа РВС с номинальным объемом 10000 м^3 , конструкция которого способна выдерживать различные нагрузки, в том числе выше критических. Данное условие было принято для возможности рассмотрения зависимости величины выбросов паровоздушной смеси (ПВС) от давлений срабатывания клапана при различных значениях. Известно, что при высоких избыточных давлениях в резервуаре могут наступить предельные деформации, способные привести к нарушению его работоспособности или аварийной работе.

Хранение нефти в резервуаре с момента налива осуществлялось в летний период – с июня по август включительно. В качестве географического местоположения резервуара выбран город Тюмень. Гидрометданные взяты из архива погоды, в котором интервальность замера температуры окружающего воздуха и атмосферного давления составляла каждые 3 часа. Также учитывалось, что резервуар первоначально не заполнен, т. е. уровень нефти в резервуаре минимален и равен высотной отметке расположения приемо-

раздаточного патрубка по его нижней образующей. Для расчета абсолютного давления в резервуаре при окончании процесса налива нефти принималось, что объем паровоздушного пространства составлял 1578 м^3 , т. е. степень заполнения равна 95 %.

Допускалось, что колебания температуры окружающей среды соответствовали колебаниям температуры газового пространства резервуара, в расчете не учитывались процессы испарения нефтепродуктов.

Предполагалось, что в резервуаре с момента его заполнения концентрация паров нефти в газовой смеси была задана и не изменялась, т. е. принята постоянной. В проведенном исследовании вычислялась именно масса потерь ПВС, а не паров нефти. Основным параметром в расчете является давление, создаваемое паровоздушной смесью в ограниченном газовом пространстве под действием изменения температуры и атмосферного давления окружающей среды.

Первоначально для расчета выбросов ПВС была найдена суммарная масса паров газового пространства опорожненного резервуара в начальный момент налива в него нефти. Необходимость этого заключалась в возможности нахождения минимального абсолютного давления ($P_{абс}$), которое могло бы установиться в резервуаре при удержании всей паровоздушной смеси в момент окончания процесса заполнения.

Абсолютное давление в резервуаре при степени заполнения 95 %, согласно уравнению Менделеева-Клапейрона, определяется следующим уравнением:

$$P_{абс} = \frac{m R T_k}{\mu_{п.с.} \cdot (V_{кр} + 0,05 V_{ст})}, \quad (1)$$

где m – масса паровоздушной смеси, удержанной с начала момента налива нефти в резервуар; R – универсальная газовая постоянная; T_k – температура в резервуаре в момент окончания заполнения резервуара нефтью; $\mu_{п.с.}$ – молярная масса ПВС в момент начала налива нефти в резервуар; $V_{кр}$ – объем газового пространства под крышей резервуара; $V_{ст}$ – объем цилиндрической части резервуара (рис. 1).

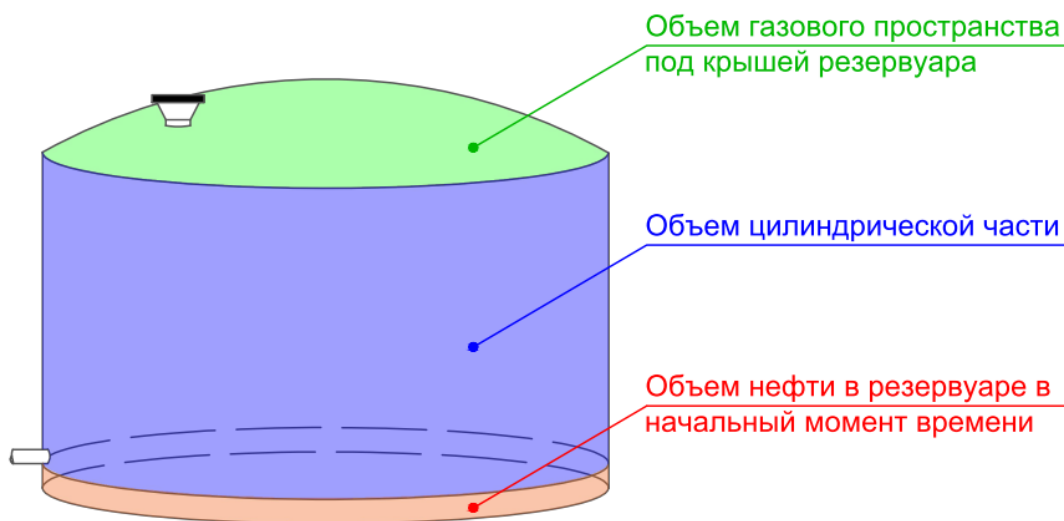


Рис. 1. Схематическое изображение резервуара в начальный момент заполнения

Fig. 1. Schematic representation of the tank at the initial moment of filling

Для определения массы паровоздушной смеси в газовом пространстве с момента налива первоначально необходимо учесть объем пространства, свободного от нефти. Принималось, что уровень нефти в резервуаре был минимален, равен высоте приемо-раздаточного патрубка, тогда объем нефти из всего геометрического объема резервуара до начала момента заполнения составил:

$$V_0 = S \cdot h_{\text{п}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} h_{\text{п}}, \quad (2)$$

где S – площадь днища резервуара; $h_{\text{п}}$ – высота расположения приемо-раздаточного патрубка; d – диаметр резервуара.

Геометрический объем всего резервуара складывается из цилиндрической части и шарового сегмента – крыши (может применяться любой другой тип с перерасчетом объема):

$$V = V_{\text{ст}} + V_{\text{кр}} = \pi r^2 h_{\text{ст}} + \pi h_{\text{кр}}^2 \cdot \left(R - \frac{1}{3} h_{\text{кр}} \right), \quad (3)$$

где $h_{\text{ст}}$ – высота стенки резервуара; r – радиус днища резервуара; R – радиус сферической крыши резервуара; $h_{\text{кр}}$ – высота крыши резервуара.

Массу паровоздушной смеси в начальный момент можно выразить через ее плотность. Предполагалось, что наличие остатка нефти до начала заполнения являлось причиной существования паров нефти в газовом пространстве, концентрация которых принималась также постоянной:

$$m = \rho_{\text{п.с.}} \cdot (V - V_0), \quad (4)$$

где $\rho_{\text{п.с.}}$ – плотность паровоздушной смеси в начальный момент.

Исходя из соотношений объемов паров нефти и воздуха в резервуаре плотность определяется как:

$$\rho_{\text{п.с.}} = \frac{\rho_{\text{н}} \cdot V_{\text{н}} + \rho_{\text{в}} \cdot V_{\text{в}}}{V_{\text{н}} + V_{\text{в}}} = \frac{\rho_{\text{н}} \cdot V_{\text{н}} + \rho_{\text{в}} \cdot (V - V_0 - V_{\text{н}})}{V - V_0}, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{н}}$ – плотность воздуха и паров нефти в газовом пространстве соответственно; $V_{\text{в}}$, $V_{\text{н}}$ – парциальные объемы воздуха и паров нефти в газовом пространстве соответственно.

Объем газового пространства, занятого парами нефти, можно определить основываясь на уравнениях молекулярной физики:

$$V_{\text{н}} = \frac{\vartheta R T_{\text{к}}}{P_0}, \quad (6)$$

где P_0 – давление в резервуаре в момент начала налива нефти; ϑ – количество вещества паров нефти в момент заполнения нефтью резервуара.

Количество вещества паров нефти:

$$\vartheta = \frac{P_{\text{н}}(V - V_0)}{RT}, \quad (7)$$

где $P_{\text{н}}$ – парциальное давление паров нефти до налива.

Величина парциального давления паров нефти используется для расчета первоначальной массы паровоздушной смеси, находившейся в РВС. В дальнейшем расчет ведется именно для массы ПВС с объемной концентрацией, принятой постоянной, что является допущением.

Молярную массу можно определить, используя формулу Менделеева–Клапейрона:

$$\mu_{\text{п.с.}} = \frac{\rho_{\text{п.с.}} RT}{P_0}. \quad (8)$$

Дальнейший расчет осуществлялся согласно представленному алгоритму (рис. 2).

Входным параметром для идентификации потерь ПВС является значение абсолютного давления $P_{\text{абс}}$ (1), рассчитанного с использованием формул (2)–(8). Для возможности оценки количества находящейся массы паровоздушной смеси в резервуаре после «большого» дыхания алгоритм расчета сводится к сравнению абсолютного давления ($P_{\text{абс}}$), вызванного сжатием газового пространства, и давления, которое может установиться в резервуаре с учетом использования дыхательной оснастки. На основе этих сравнений определяется давление ($P_{\text{ра(уточн.)}}$), установившееся в резервуаре и находящееся в диапазоне давлений работы клапана.

При открытии клапана на избыточное давление часть массы ПВС вытравливается в атмосферу с РВС до установочных (расчетных) значений клапана ($P_{\text{изб}}$). Количественные потери смеси (Δm) определяются разницей между массами ПВС, находившимися в РВС до ($m_{\text{н-1}}$) и после момента срабатывания клапана ($m_{\text{н}}$).

Аналогично рассчитывается изменение массы ПВС при работе клапана на вакуум ($P_{\text{вак}}$). В частности, случаи давления срабатывания клапана на вакуум возможны, когда атмосферное давление больше абсолютного давления в резервуаре на величину настройки клапана на вакуум.

Масса ПВС не изменится при давлении газового пространства, находящегося в диапазоне работы дыхательной арматуры ($\Delta m = 0$).

При дальнейшем хранении нефти в резервуаре на изменение состояния системы газового пространства влияет изменение во времени условий окружающей среды. Возможность дальнейшего расчета изменений массы ПВС в резервуаре с течением времени определяется на основе прироста или уменьшения значений атмосферного давления ($P_{\text{атм}}$) и температуры воздуха ($T_{\text{н}}$) по отношению к давлению, установленному в резервуаре на момент по прошествии действия «выдоха» или «вдоха» ($P_{\text{ра(уточн.)}}$). В результате полученное значение ($P_{\text{ра(н.)}}$) уточняется, и цикл расчета повторяется с учетом изменений условий окружающей среды.

Результаты

Произведенное авторами исследование установило, что настройка дыхательных клапанов на большее избыточное давление срабатывания приводит к более сложной зависимости потерь от производимых дыханий в резервуаре. В связи с этим при установке в клапанах определенных значений давлений часть потерь от «больших» дыханий может переходить в область потерь от «малых» дыханий. Последнее приводит к иному выводу в источнике [23], к «исключению» выбросов от «больших» дыханий и только частично от «малых».

Исходные данные для расчета

Параметры ПВС
1. $\mu_{п.с.}$ (молярная масса)
2. m (масса ПВС)

Параметры РВС
1. d (диаметр резервуара)
2. $h_{ст.}$ (высота стенки)
3. $h_{кр.}$ (высота крышки)
4. R (радиус сферической крышки)
5. $P_{изб.}$ (избыточное давление клапана)
6. $P_{вак.}$ (давление срабатывания на вакуум)
7. n (процент заполнения)

Параметры ОС
1. T_1, T_2, \dots, T_n (температура ОС)
2. $P_{атм1}, P_{атм2}, \dots, P_{атмn}$ (атмосферное давление)

Алгоритм расчета

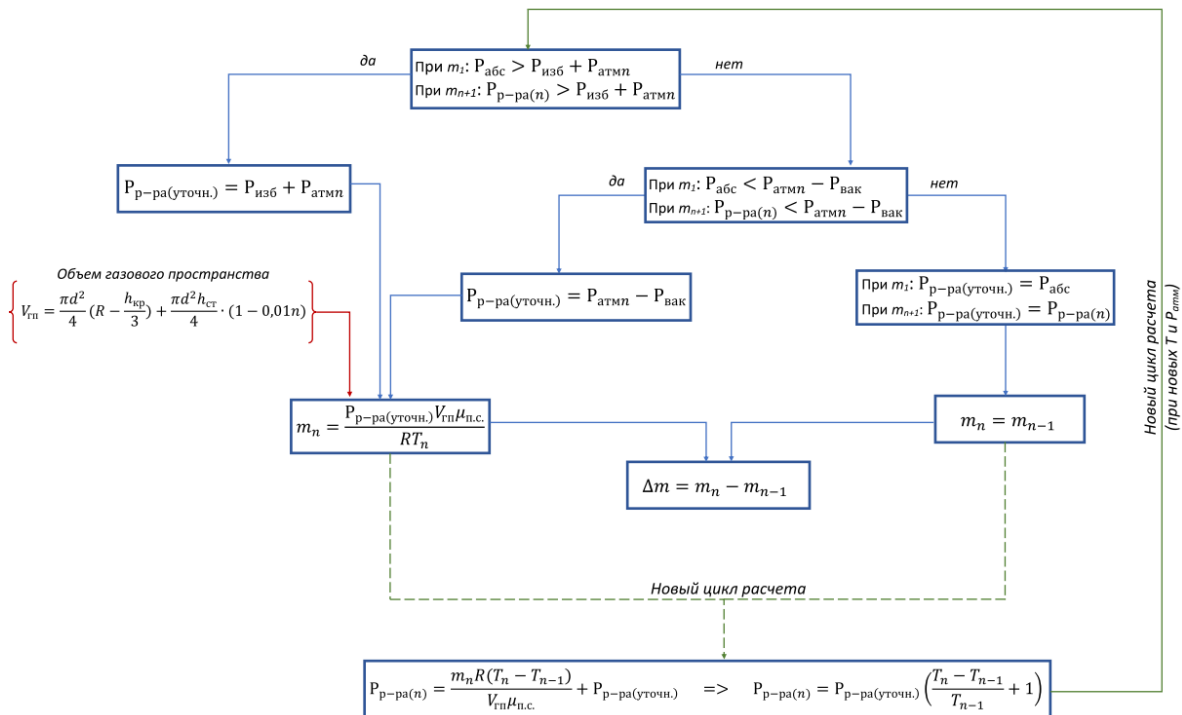


Рис. 2. Алгоритм для расчета выбросов паровоздушной смеси
 Fig. 2. Algorithm for calculating emissions of a vapor-air mixture

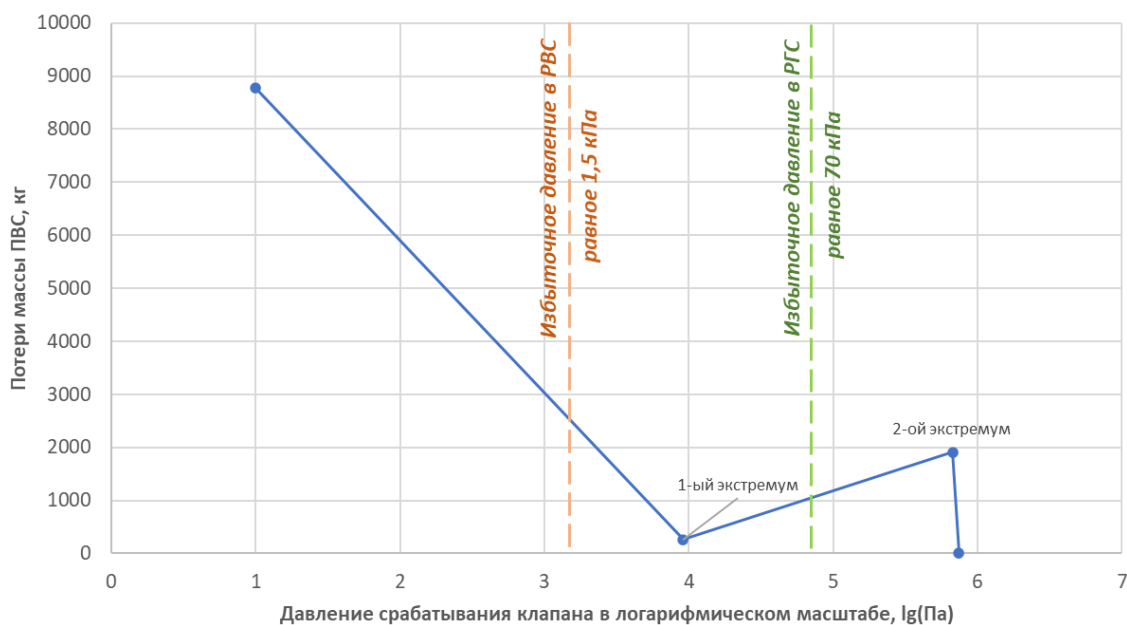


Рис. 3. Зависимость потерь массы паровоздушной смеси от давления срабатывания клапана при «малых» дыханиях
 Fig. 3. Dependence of the mass loss of the vapor-air mixture on the valve actuation pressure at «small» breaths

В процессе приема нефти и нефтепродуктов происходит уменьшение газового пространства и сжатие паровоздушной смеси, приводящее к росту абсолютного давления в резервуаре. В зависимости от величины давления срабатывания клапана только определенная часть ПВС удерживается и не выбрасывается в атмосферу. При дальнейшей эксплуатации под действием температуры и атмосферного давления для оставшейся части смеси характерны процессы увеличения или уменьшения объёмов пара и газа, приводящие к последующим потерям или поступлению воздуха соответственно. В случае настройки клапанов на большее давление срабатывания количество ПВС, удерживаемое при «большом» дыхании, становится выше, и величина технологических потерь в сильной мере начинает зависеть от температурных и атмосферных колебаний окружающей среды. Данные колебания в ограниченном газовом пространстве приводят к увеличению внутренней энергии и сжатию смеси, увеличению абсолютного давления и последующим потерям при «малых» дыханиях.

Согласно проведенному расчету, зависимость потерь масс паровоздушной смеси от величины давления срабатывания клапана имеет ярко выраженные экстремумы (рис. 3), которые свидетельствуют о различной эффективности применения клапанов при определенных значениях давления.

Обсуждение

Диапазон давления срабатывания до значения первого экстремума указывает на первоначально эффективное применение дыхательных клапанов по борьбе с потерями от «малых» дыханий. Объясняется это тем, что при теоретической оснастке резервуара дыхательной арматурой на избыточное давление, близкое к атмосферному, основная часть потерь приходится на «большое» дыхание, по сравнению с которым потери от «малых» дыханий оставшейся части значительно меньше. На указанном участке графика, несмотря на снижение потерь от «малых» дыханий, общие потери смеси при хранении самые большие.

При последующем теоретическом увеличении давления срабатывания клапана до давлений, много превышающих его технические возможности, наблюдается увеличение потерь от «малых» дыханий, которых, казалось, не должно быть. Дело в том, что при возможности обеспечения в резервуаре высокого избыточного давления потери при «большом» дыхании существенно сокращаются и приводят к удержанию в нем значительной массы смеси. Молекулы данной смеси при возрастании температуры в ограниченном газовом пространстве увеличивают свою скорость движения и чаще соударяются о стенки внутренней поверхности резервуара, что приводит к дальнейшему росту давления в нем. При достижении его предельного значения в атмосферу стравливается сжатая паровоздушная смесь, удержанная преимущественно с момента налива. Другими словами, общее сокращение потерь на выявленном промежутке давлений достигается путем снижения выбросов смеси от «больших» дыханий и перехода их в область «малых» ды-

ханий. Отмечено, что на данном участке потери смеси от «малых» дыханий будут увеличиваться до момента наступления в резервуаре абсолютного давления, способного удержать всю массу паров смеси, хранящейся в резервуаре с момента опорожнения. Это указывает на то, что потери от «больших» дыханий в конечном счете станут равны нулю, и все выбросы будут приходиться только на «малые» дыхания. Общие потери паровоздушной смеси при увеличении давления срабатывания клапана уменьшаются.

На последнем промежутке наблюдается сокращение потерь ПВС при «малых» дыханиях. Причиной такого снижения является возможность дыхательного клапана достигать и превосходить значение избыточного давления, которое создается с момента налива паровоздушной смесью. Возможность удержания большего давления не является фактором, действующим на увеличение степени сжатия смеси ввиду ограниченности массы ПВС, сохранившейся с момента поступления нефти в резервуар. Создается «запас» давления, который позволяет минимизировать влияние колебаний атмосферного давления и температуры на рассматриваемую систему и в конечном счете его исключить. Общие потери смеси на данном участке определяются только «малыми» дыханиями, когда увеличение температуры и снижение атмосферного давления еще позволяют превысить предельное значение давления работы клапана.

Динамика выбросов паровоздушной смеси в рассмотренных ранее интервалах давлений дыхательных клапанов представлена на рис. 4.

При настройке дыхательных клапанов на избыточные давления, соответствующие интервалу до первого экстремума, в частности 1,5 и 4 кПа, по графику наблюдаются интенсивные колебания изменения масс ПВС, характеризующиеся частыми потерями смеси и поступлениями воздуха в резервуар. Потери при работе клапана на 4 кПа в 3,9 раз меньше по сравнению с его работой на 1,5 кПа. При увеличении избыточного давления срабатывания клапана до 300 кПа наблюдается увеличение выбросов, притом их большее количество приходится на первую половину месяца после налива резервуара. Возможность удержания смеси при избыточном давлении 672 кПа превышает потери в 1,9 раза по сравнению с клапаном, рассчитанным на работу 300 кПа, по причине только начала процесса «разряжения» смеси в резервуаре. При избыточном давлении 735 кПа потери значительно сокращаются, и по отношению к клапану с установленным давлением на 672 кПа уменьшаются в 9,4 раза.

Заключение

Подводя итоги всего вышеизложенного, можно утверждать, что исключить потери от «малых» дыханий в резервуарах только настройкой клапанов на большее давление практически невозможно. Согласно исследованию, график зависимости потерь паровоздушной смеси от давлений срабатывания дыхательной арматуры с учетом колебаний температуры и атмосферного давления имеет экстремумы, указывающие на возможность увеличения выбросов путем

перехода их из области «больших» дыханий в область «малых». Наличие такого перехода приводит к росту потерь от производимых «малых» дыханий в 7,25 ра-

за (масса потерь в точке первого экстремума за три месяца: 262,87 кг; масса потерь в точке второго экстремума: 1906 кг).

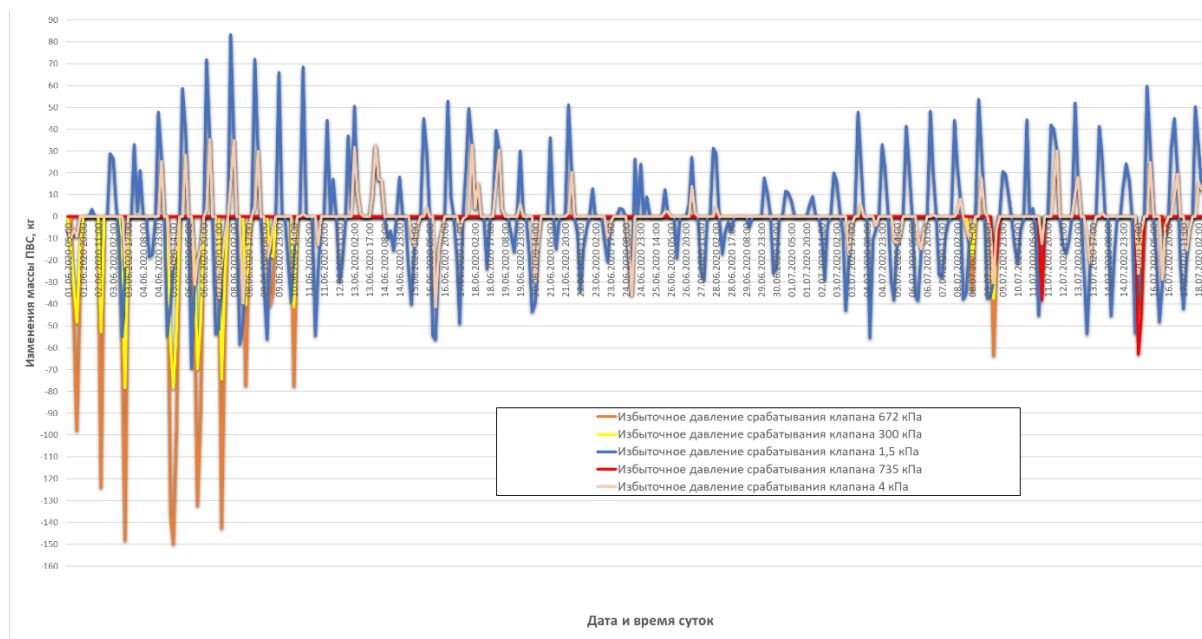


Рис. 4. Динамика выбросов паровоздушной смеси и поступлений воздуха в резервуар

Fig. 4. Dynamics of emissions of the vapor-air mixture and air inflows into the tank

На основании этого можно заключить, что в практике предприятий транспортной инфраструктуры нефтяной промышленности остро стоит необходимость в разработке и внедрении новых, более совершенных

способов и технологий, которые бы позволяли полностью исключать потери от производимых дыханий в резервуаре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриевский А.Н. Ресурсосбережение: основные задачи и направления ресурсосбережения в нефтяной и газовой промышленности // Вестник ОНЗ РАН. – 2010. – Т. 2. – С. 1–17. DOI: 10.2205/2010NZ000015.
2. Коршак А.А. Ресурсо- и энергосбережение при транспортировке и хранении углеводородов. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2016. – 411 с.
3. Danilov V.F., Shurygin V. Yu. To the question about ways to solve the problem of evaporation loss of oil products // Advances in current natural sciences. – 2016. – V. 3. – P. 141–145.
4. Потенциальные риски потерь нефтепродуктов при хранении и анализ путей их снижения / Г.Г. Васильев, И.А. Леонович, С.Н. Левин, В.М. Писаревский // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 5. – С. 87–93. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-87-93.
5. Шацких Е.С., Левин С.Н., Писаревский В.М. Анализ современных методов борьбы с потерями нефти и нефтепродуктов // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2018. – № 2 (291). – С. 49–59.
6. Hermawan Y.D., Kristanto D., Hariyadi. Oil losses problem in oil and gas industries, Yogyakarta, Indonesia // Crude oil – new technologies and recent approaches. – 2021. – 21 p. DOI:10.5772/intechopen.97553.
7. Development of a new method for reducing the loss of light hydrocarbons at breather valve of oil tanks / M.M. Farhan, M.M. Al-Jumaily, A.D. Al-Muhammadi, A.S. Ismail // Energy Procedia. – 2017. – V. 141. – P. 471–478.
8. Шацких Е.С., Левин С.Н., Писаревский В.М. Применение гранулированного пеностекла в качестве покрытия зеркала испарения нефтяных резервуаров // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2018. – № 4. – С. 17–21.
9. Abdelmajeed M.A., Onsa M.H., Rabah A.A. Management of evaporation losses of gasolines storage tanks // Sudan Engineering Society Journal. – 2009. – V. 55 (52). – P. 39–43.
10. Черников В.И. Сооружение и эксплуатация нефтебаз: учебное пособие для нефтяных вузов. – М.: Гостоптехиздат, 1955. – 522 с.
11. Зоря Е.И., Орехова И.В., Черезова А.С. Сравнительный анализ методик расчета потерь легких фракций углеводородов из резервуаров хранения // Промышленный сервис. – 2017. – № 3 (64). – С. 12–17.
12. Коршак А.А. Современные средства сокращения потерь бензина от испарения. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2001. – 143 с.
13. Способ определения потерь нефти и нефтепродуктов от испарения при малых дыханиях резервуаров: пат. Рос. Федерация, № 2561660, заявл. 04.02.2014; опубл. 27.08.2015. Бюл. № 24. – 9 с.
14. Flutter speed estimation using presented differential quadrature method formulation / M. Ghalandari, S. Shamshirband, A. Mosavi, K. Chau // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2019. – V. 13 (1). – P. 804–810.
15. A new method for reducing VOCs formation during crude oil loading process / H.R. Karbasian, D.Y. Kim, S.Y. Yoon, J.H. Ahn, K.C. Kim // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2017. – V. 31 (4). – P. 1701–1710.
16. Коршак А.А., Бусыгин Г.Н., Галаутдинов А.Б. О расходах через дыхательную арматуру резервуаров при «больших дыханиях» // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 1995. – № 7. – С. 11–12.
17. Левитин Р.Е. Зарубежный и российский опыт определения выбросов паров нефти из вертикальных стальных резервуаров: монография. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – 160 с.
18. Veronico L.K., Yansen H., Antonius I. Surface cover method to reduce evaporation rate of crude oil // IOP Conference Series

- Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 823. – P. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/823/1/012012
19. Совершенствование системы обеспечения качества нефтепродуктов при транспортировке трубопроводным транспортом / С.Б. Хотничук, В.В. Бортник, Ф.В. Тимофеев, А.А. Кузнецов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – Т. 7. – № 5. – С. 88–96.
 20. Зоря Е.И., Лощенкова О.В. Оценка общедоступных технологий и методов определения потерь нефтепродуктов от испарений из резервуаров при хранении // Экологический вестник России. – 2019. – № 1. – С. 14–20.
 21. Коршак А.А., Коршак Ан.А. Оценка вклада повышения объема паровоздушной смеси над объемом закачки в потерях нефти и нефтепродуктов от испарения // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – Т. 11. – № 4. – С. 452–459.
 22. Influence of seasonal changes in climatic conditions on losses at oil tanks filling (on example of the Republic of Bashkortostan) / A. Elizaryev, D. Tarakanov, S. Aksenov, De. Tarakanov, E. Elizareva, E. Nasyrova, A. Nazyrov // Interagro mash. – 2020. – № 175 (1). – P. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/202017512021.
 23. Рудин М.Г., Арсеньев Г.А., Васильев А.В. Общезаводское хозяйство нефтеперерабатывающего завода. – Л.: Химия, 1978. – 312 с.
- Поступила: 15.03.2022 г.
Дата рецензирования: 11.05.2022 г.*

Информация об авторах

Левитин Р.Е., кандидат технических наук, доцент Высшей инженерной школы Тюменского индустриального университета.

Цицельская В.А., студент Тюменского индустриального университета.

UDC 621.642.84

EFFICIENCY OF USING BREATHING VALVES AT THEORETICALLY HIGH PRESSURES OF THEIR OPERATION

Roman E. Levitin¹,
746636@mail.ru

Veronika A. Tsytselskaya¹,
tsytselskayaveronika@gmail.com

¹ Tyumen Industrial University,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

The relevance. The article highlights the problem of losses of oil and oil products during the production of tank batteries, that existences affect economic and environmental aspects of the sustainable use of resources. To reduce hydrocarbon emissions, enterprises are currently using various technological means. The achieved effect of the application of existing and developing methods to combat losses can be determined by applying specialized calculation methods, which, due to the use of various assumptions in the calculations by the authors, the presence of errors of measuring instruments during experimental studies are imperfect. Therefore, at the moment, the possibility of a reliable assessment of the effectiveness of methods for reducing losses is one of the main tasks for establishing really achievable emissions during the operation of tank farms and the correct choice of using technological means of their equipment.

The main aim of the research is to determine the effectiveness of reducing emissions by excessive pressure storage as the effective way.

The object: vertical steel tank with a nominal volume of 10000 m³, the structure of which is able to withstand various loads, and breathing valves with the ability of setting a wide pressure range, including pressure range more than the calculated one of currently installed on vertical steel tanks.

Methods: analytical methods of molecular-kinetic theory.

Results. The article describes the results of the authors' researches indicating that the setting of the breathing valves on a greater excessive pressure of activation leads to a more complex dependence of losses of the vapor-air mixture depending on large and small breaths in the vertical steel tank. It is estimated that theoretically high actuation pressures of breathing valves can be observed increasing losses from produced «small» breaths by 7,25 times, that highlights the necessity of invention of technologies and methods that can exclude emissions of the vapor-air mixture.

Key words:

vapor-air mixture, mixture losses, tank, efficiency, breathing valve, actuation pressure, oil, oil products, loss reduction, large breaths, small breaths, gas space.

REFERENCES

- Dmitrievsky A.N. Resursoberezhenie: osnovnye zadachi i napravleniya resursoberezheniya v neftyanoy i gazovoy promyshlennosti [Resource conservation: the main tasks and directions of resource conservation in the oil and gas industry]. *Vestnik ONZ RAN*, 2010, no. 2, pp. 1–17. DOI: 10.2205/2010NZ000015.
- Korshak A.A. *Resurso- i energosberezhenie pri transportirovke i khranении ugleodorodov* [Resource and energy saving during transportation and storage of hydrocarbons]. Rostov-on-the-Don, Feniks Publ., 2016. 416 p.
- Danilov V.F., Shurygin V.Yu. To the question about ways to solve the problem of evaporation loss of oil products. *Advances in current natural sciences*, 2016, vol. 3, pp. 141–145. In Rus.
- Vasiliev G.G., Leonovich I.A., Levin S.N., Pisarevsky V.M. Potential risks of oil product losses during storage and analysis of ways for reducing them. *Occupational safety in industry*, 2020, no. 5, pp. 87–93.
- Shatskikh E.S., Levin S.N., Pisarevsky V.M. Analysis of current methods to combat losses of oil and petroleum products, *Proceedings of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas*, 2018, no. 2 (291), pp. 49–59.
- Hermawan Y.D., Kristanto D., Hariyadi. Oil Losses Problem in Oil and Gas Industries, Yogyakarta, Indonesia. *Crude oil – new technologies and recent approaches*, 2021, 21 p. DOI: 10.5772/intechopen.97553.
- Farhan M.M., Al-Jumaily M.M., Al-Muhammadi A.D., Ismail A.S. Development of a new method for reducing the loss of light hydrocarbons at breather valve of oil tanks. *Energy Procedia*, 2017, vol. 141, pp. 471–478.
- Shatskikh E.S., Levin S.N., Pisarevsky V.M. Application of granulated foam glass as a coating of the evaporation mirror of oil tanks. *Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*, 2018, no. 4, pp. 17–21. In Rus.
- Abdelmajeed M.A., Onsa M.H., Rabah A.A. Management of evaporation losses of gasolines storage tanks. *Sudan Engineering Society Journal*, 2009, vol. 55, no. 52, pp. 39–43.
- Chernikin V.I. *Sooruzhenie i ekspluatatsiya neftebaz* [Construction and operation of oil depots]. Moscow, Gostoptehizd at Publ., 1955. 522 p.
- Zorya E.I., Orekhova I.V., Cherezova A.S. The comparative analysis of method of calculation of losses of easy fractions of hydrocarbons from storage tanks. *Industrial service*, 2017, no. 3 (64), pp. 12–17. In Rus.
- Korshak A.A. *Sovremennye sredstva sokrashcheniya poter benzina ot ispareniiya* [Modern means of reducing gasoline losses from evaporation]. Ufa, DesignPolygraphService Publ., 2001. 143 p.
- Zemenkov Yu.D., Levitin R.E., Dyakov K.V. *Sposob opredeleniya poter nefi i nefteproduktov ot ispareniiya pri malykh dyhaniyakh rezervuarov* [Method to detect losses of oil and oil products from evaporation under inbreathing of reservoirs]. Patent RF, no. 2561660, 2015.
- Ghalandari M., Shamshirband S., Mosavi A., Chau K. Flutter speed estimation using presented differential quadrature method formulation. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2019, vol. 13, pp. 804–810.
- Karbasiyan H.R., Kim D.Y., Yoon S.Y., Ahn J.H., Kim K.C. A new method for reducing VOCs formation during crude oil loading process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, vol. 31, pp. 1701–1710.
- Korshak A.A., Busygin G.N., Galyautdinov A.B. O raskhodakh cherez dykhatelnuyu armaturu rezervuarov pri «bolshikh» dyhaniyakh [About expenses through the breathing valves of tanks during «big» breaths]. *Transport i khranenie nefteproduktov i ugleodorodno go syrja*, 1995, no. 7, pp. 11–12.
- Levitin R.E. *Zarubezhny i rossiyskiy opyt opredeleniya vybrosov parov nefi iz vertikalnykh stalnykh rezervuarov* [Foreign and Rus-

- sian experience in determining oil vapor emissions from vertical steel tanks: monograph]. Tyumen, TSOGU Publ., 2015. 160 p.
18. Veronico L.K., Yansen H., Antonius I. Surface cover method to reduce evaporation rate of crude oil. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 823, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/823/1/012012.
 19. Khotnichuk S.B., Bortnik V.V., Timofeev F.V., Kuznetsov A.A. Improvement of the quality assurance system for oil products to be transported by pipelines. *Science and technology of pipeline transportation of oil and oil products*, 2017, vol. 7, no. 5, pp. 88–96. In Rus.
 20. Zorya E.I., Loshchenkova O.V. Otsenka obshchedostupnykh tekhnologiy i metodov opredeleniya poter nefteproduktov ot ispareniy iz rezervuarov pri khraneni [Evaluation of publicly available technologies and methods for determining losses of petroleum products from evaporation from storage tanks]. *Ekologicheskiy vestnik Rossii*, 2019, no. 1, pp. 14–20.
 21. Korshak A.A., Korshak An. A. Assessment of the contribution of the air-vapor mixture volume exceeding over the volumes injected to oil and petroleum product losses from evaporation. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 452–459. In Rus.
 22. Elizaryev A., Tarakanov D., Aksenov S., Tarakanov De., Elizareva E., Nasyrova E., Nazyrov A. Influence of seasonal changes in climatic conditions on losses at oil tanks filling (on example of the Republic of Bashkortostan). *Interagromash*, 2020, no. 175 (1), pp. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/202017512021.
 23. Rudin M.G. *Obshchezavodskoe khozyaystvo neftepererabatyvayushchego zavoda* [The general factory economy of an oil refinery]. Leningrad, Khimiya Publ., 1978. 312 p.

Received: 15 March 2022.

Reviewed: 11 May 2022.

Information about the authors

Roman E. Levitin, Cand. Sc., associate professor, Tyumen Industrial University.

Veronika A. Tsyselskaya, student, Tyumen Industrial University.

УДК 622.014.1

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТРАБОТКИ АЛМАЗОНОСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Анисимов Кирилл Артемович¹,
anisimov.kirill.95@list.ru

Никифоров Александр Владимирович¹,
nikiforov_av@pers.spmi.ru

¹ Санкт-Петербургский горный университет,
Россия, 190106, г. Санкт-Петербург, 21-линия В.О., 2.

Актуальность данной работы состоит в объединении и обобщении опыта ведения открытых, а также подземных горных работ и применения современных наукоемких технологий для экономически эффективной разработки алмазоносных месторождений полезных ископаемых в районах Крайнего Севера России. Проведенный в данной научной статье анализ позволяет дать объективную оценку процессу развития горнопромышленной отрасли в области ведения горных работ на алмазоносных месторождениях полезных ископаемых и внедрения современных высокоэффективных технологий для месторождений со сложными условиями разработки в криолитозоне.

Цель: проведение анализа современных наукоемких технологий разработки алмазоносных месторождений полезных ископаемых, которые расположены в криолитозоне.

Объекты: алмазоносные рудные тела вертикального и субвертикального заложения, расположенные в криолитозоне.

Методы: оценка и анализ опыта ведения открытых и подземных горных работ, которые расположены в криолитозоне, синтез и обобщение материалов, источников и данных, находящихся в открытом доступе, а также современных высокоэффективных наукоемких технологий разработки алмазоносных месторождений полезных ископаемых в климатических районах Крайнего Севера.

Результаты. Были обозначены основные проблемы, которые возникают при отработке кимберлитовых рудных тел, расположенных в криолитозоне, были представлены и обоснованы выводы о дальнейшем эффективном применении оптимальных технологических схем открытой и подземной отработки кимберлитовых рудных тел, которые позволяют обеспечить в высокой безопасности при ведении горных работ, дополнительную экономическую эффективность и гибкость технологии производства при отработке кимберлитовых рудных тел в районах Крайнего Севера.

Ключевые слова:

Рудные месторождения, буровзрывные работы, алмазы, алмазодобыча, подземные работы, открытые работы, рынок алмазов, BIM-технологии, цифровизация, кимберлитовая трубка, предохранительная подушка, подкарьерные запасы.

Введение

Сектор добычи минерального сырья является важнейшим элементом мировой экономики и ключевой отраслью Российской Федерации [1–3]. По состоянию на 2021 г. не менее 10,5 % всего ВВП страны связано с добычей полезных ископаемых [4], что дает возможность Правительству Российской Федерации проводить долгосрочную политику по развитию и оптимизации минерально-сырьевой базы страны. Российская Федерация является важным участником мирового рынка минерального сырья, внося свой весомый вклад в развитие многих стран, что позволяет ей при помощи высоких показателей экспорта развивать внутренние рычаги работы горнорудных предприятий – так, Правительством Российской Федерации, в распоряжении № 2914-р от 22 декабря 2018 г. была предложена стратегия развития и разработки минерально-сырьевой базы Российской Федерации на временной промежуток до 2035 г. Данное распоряжение имеет прямое влияние на актуальность поднятой на текущий момент темы, связанной с развитием рынка добычи алмазов. На текущий момент Россия является мировым лидером в добыче и извлечении алмазного сырья алмазоносных месторождений полезных ископаемых – не менее трети всех мировых алмазов были добыты на территории Российской Федерации [1, 3]. Главенствующее место на мировом рынке добычи и переработки алмазного сырья занимает акционерная компания «АЛРОСА» (ПАО) – по

результатам 2021 г. данная компания занимает в мире лидирующие позиции по общему объему добычи неограниченных алмазов, не менее 30 % алмазного сырья было добыто с месторождений АК «АЛРОСА» (ПАО) [5]. В распоряжении правительства Российской Федерации ожидаемый прогноз добычи алмазов к 2025 г. составляет не менее 43,3 миллионов карат [2].

Краткий анализ алмазного рынка

В 2021 г. экспертами Vain & Company был проведен подробный анализ рынка добычи алмазов, где был дан прогноз касательно общего объема добычи алмазного сырья [1]. По их мнению, к 2030 г. мировой рынок ожидает резкое снижение уровня добычи, так, в оптимистичном сценарии, мировой объем добычи снизится со 150 миллионов карат в 2018 г. до 120 миллионов карат к 2030 г., где снижение будет менее болезненным благодаря вовремя введенным в эксплуатацию рудникам и карьерам (рудники «Мир», «Юбилейный», «Заря», «Майская», «Luaxe», «Chidliak», «Star-Orion South», «Tongo-Tonguma Diamond Project» и др.). Консервативный вариант предполагает снижение уровня добычи до 95 млн карат и обосновывается долгим восстановлением мировых экономик после эпидемии коронавирусной инфекции (представленные варианты не предусматривают возможности возникновения форс-мажорных ситуаций в виде продолжения эпидемии, военных действий, рецессий мировых экономик и пр.) [1].

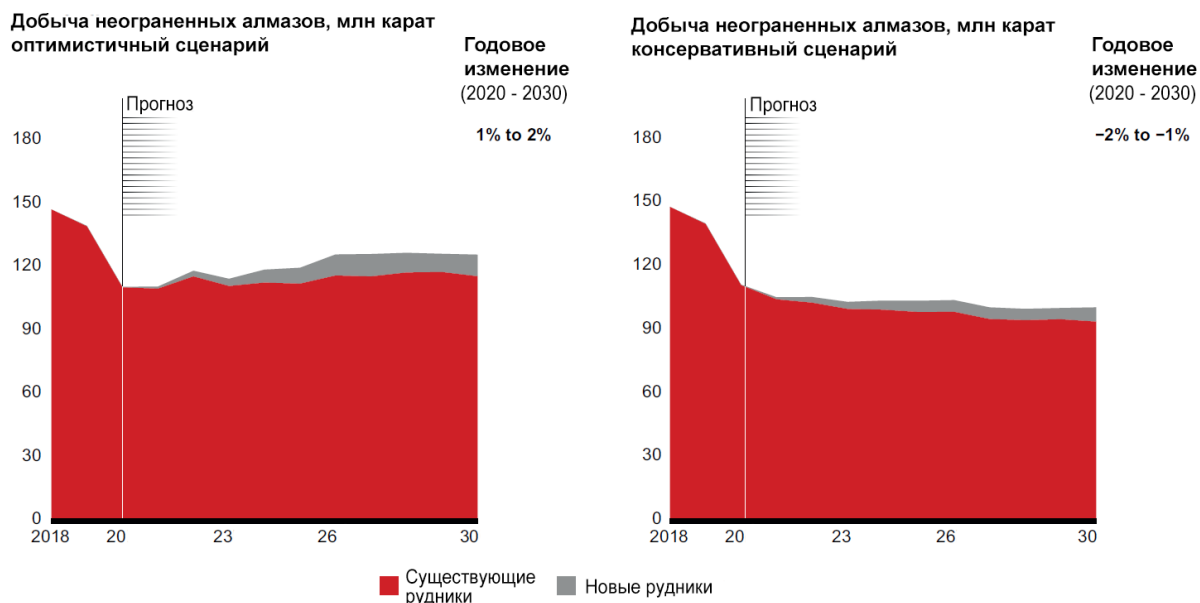


Рис. 1. Ожидаемый график мировой добычи алмазного сырья [1]

Fig. 1. Expected schedule for global rough diamond production [1]

На текущий момент сложно говорить о жизнеспособности данного прогноза, который на момент написания данной научной статьи уже движется по негативному сценарию, однако дальнейшее снижение уровня мировой добычи было связано не столько с плановым закрытием карьеров и рудников в мире и с проходящей эпидемией коронавирусной инфекции, но и с плавным изменением мировой карты потребления алмазов. Так, по состоянию на расчётный 2020 г. не менее 97 % всей прибыли от реализации алмазов занимает сектор ювелирных алмазов, тогда как их объем добычи от общего числа до-

бытых алмазов составляет не более 60 % (не менее 40–45 % всех добываемых алмазов являются индустриальными). Смена поколений способна внести данные изменения – эксперты уже регистрируют снижение уровня потребления населением бриллиантов. Так, поколение Z и миллениалы уже имеют иную модель потребления, что требует от алмазных компаний пересмотра своей маркетинговой стратегии, что, в свою очередь, может вести к снижению общих темпов добычи и снижению необходимости в активной разработке алмазосодержащих месторождений полезных ископаемых [3].

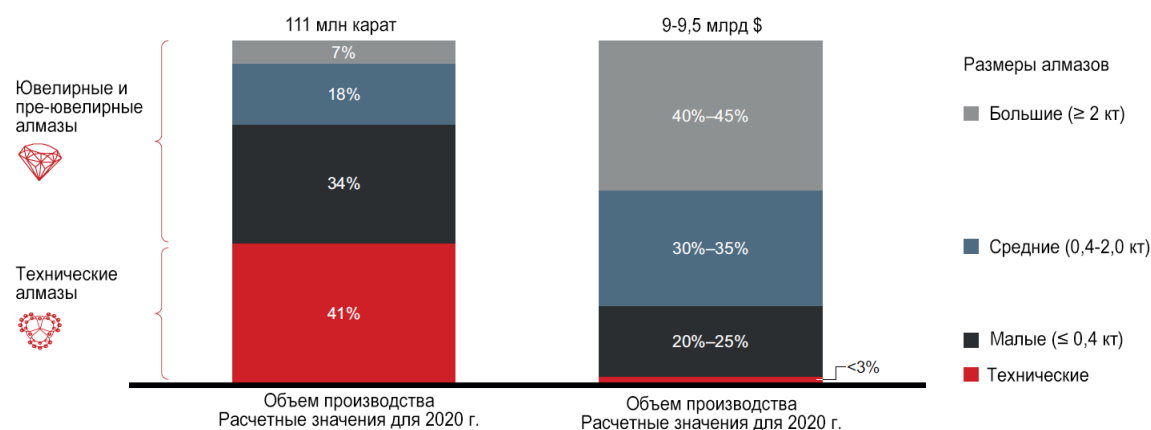


Рис. 2. Рынок потребления алмазов, промышленных и ювелирных [1]

Fig. 2. Market for the consumption of diamonds, industrial and jewelry [1]

Для мирового алмазного рынка сектор добычи алмазного сырья является основополагающим, обеспечивая своей добычей и технологиями устойчивый рост секторов огранки и сбыта бриллиантов. Именно современные высокоэффективные и оптимальные технологии позволяют функционировать, создавать и проектировать новые горнопромышленные объекты. Современная область добычи алмазоносного сырья на теку-

щий момент находится в сложном состоянии – мировая пандемия коронавирусной инфекции снизила продажи алмазного сырья на 30 млн карат (не менее 4,1 млрд долл. США), что вынудило алмазодобытчиков запустить программу «Цена выше объема» [1]. По данной программе были закрыты слабоэффективные рудники, некоторые небольшие горнодобывающие компании были вынуждены приостановить свою до-

бычу более чем на 6 месяцев. Снижение объемов продаж для поддержания цены за 1 карат бриллиантов привело к тому, что запасы алмазного сырья на 2021 г. были увеличены более чем на 7 млн карат [1, 6].

Цели и задачи обзора

Технологии добычи алмазного сырья разнообразны, вопросы эффективной добычи, извлечения и обогащения алмазосодержащих руд изучены достаточно сильно мировым сообществом [7, 8]. В данной статье мы сконцентрируемся на области добычи алмазного сырья, методах и технологиях разработки алмазосодержащих руд, не касаясь вопросов бережного извлечения алмазов из руды при помощи специальных инструментов, вопросов общего обогащения руд и поиска новых месторождений полезных ископаемых.

На текущий момент основными регионами для подземной добычи полезных ископаемых являются регионы со слабо развитой инфраструктурой (Крайний Север России, Канада, Центральная и Южная Африка и др.) [9–12]. Подземная разработка таких месторождений полезных ископаемых требует постоянного ведения и совершенствования обширного комплекса научно-исследовательской деятельности по внедрению и применению инновационных технологий по отработке алмазоносных месторождений. Данное утверждение особенно актуально для разработки так называемых переходных зон – части месторождения полезного ископаемого, где завершается открытая разработка полезного ископаемого и начинаются подземные горные работы [13–16].

В России для алмазоносных месторождений задачи по комплексному подземному освоению недр были реализованы целым рядом программ по выполнению научно-исследовательской деятельности силами государственных и частных проектных и научных институтов, а также при непосредственном участии крупнейших алмазодобывающих компаний. Современные тренды развития смогли сформировать требования к горным работам, а сотрудники горнодобывающих

компаний смогли реализовать целые комплексы технологических мероприятий по обеспечению безопасной и устойчивой разработки месторождений.

Основная часть

Структура и особенности алмазодобычи России

Комплексная разработка недр является процессом, требующим применения высоких технологий, – для эффективного освоения алмазоносных месторождений в районах Крайнего Севера необходимо организовать целый комплекс мероприятий, включающий в себя проведение обширных научно-исследовательских работ, проектных и изыскательских мероприятий, целью которых в результате будет являться создание эффективно действующей производственной единицы (карьера, рудника и т. п.). К вышеперечисленному также необходимо добавить необходимость постоянного технического сопровождения функционирования предприятия – для его эффективной работы любой ГОК должен состоять из высококвалифицированных кадров, включать в себя высокопроизводительное и эффективное оборудование в условиях алмазного рынка. Современные тенденции диктуют необходимость цифровизации горного производства, внедрения аспектов технологической программы «Индустрия 4.0» [17–19].

В структуре рынка добычи алмазов России лидирующую позицию занимает акционерная компания АЛРОСА, извлекая более 90 % всех алмазов и удерживая лидерство в мире, обеспечивая не менее трети всей мировой добычи [9]. Все месторождения АК «АЛРОСА» на территории РФ расположены в районах Крайнего Севера, а подземным способом на текущий момент обрабатываются три месторождения – кимберлитовые трубки «Интернациональная», «Айхал» и «Удачная». В дальнейшем планируется вводить в повторную эксплуатацию рудник «Мир», ведутся работы по технико-экономической оценке целесообразности создания подземных рудников после завершения горных работ на действующих карьерах [20].

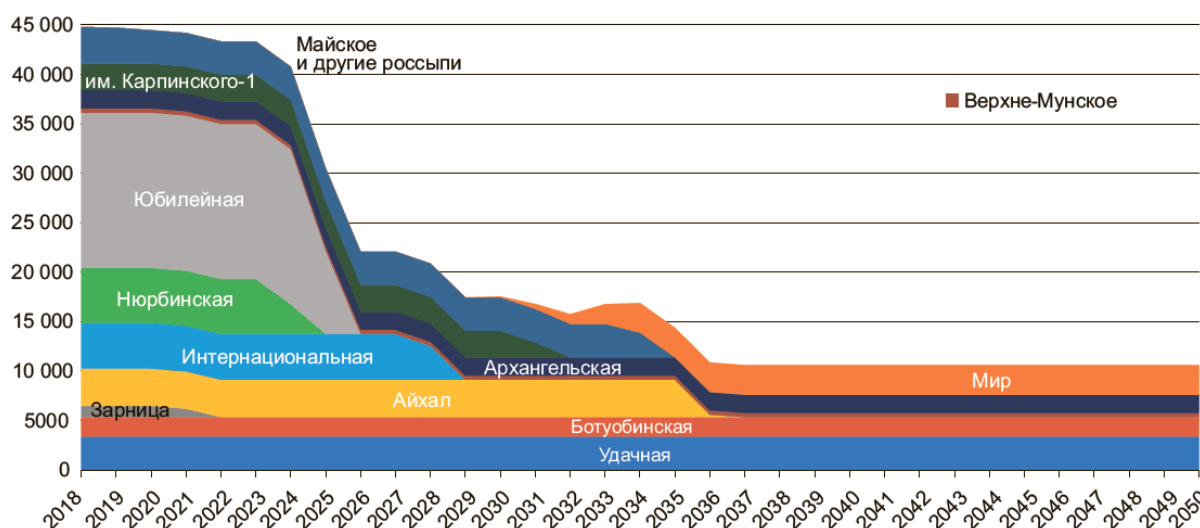


Рис. 3. Прогноз добычи алмазов на существующих месторождениях России на период 2018–2050 гг., млн карат [21]

Fig. 3. Forecast of diamond production at existing deposits in Russia, for the period 2018–2050, million carats [21]

Для месторождений АК «АЛРОСА» характерно ведение горных работ на алмазоносных месторождениях в наиболее непростых горно-геологических и климатических условиях Крайнего Севера. Многообразие и высокая сложность возникающих технических, а также практических задач, которые приходится решать Компании, невозможно без привлечения крупных научных институтов России. Научными работами, связанными с изучением технологии алмазодобычи, занимается множество научных коллективов из различных научных центров и таких крупнейших институтов, как Якутинипроалмаз, ИГД УрО РАН, Гипроникель, ИГД СО РАН, НИТУ МИСИС, СПГУ, ВНИМИ, СФО, ООО НТЦ «НОВОТЭК» и др.

Основные направления исследовательских работ ведущих научных институтов

Наиболее близким технически и географически к горному производству АК «АЛРОСА» (ПАО) является научный институт «Якутинипроалмаз», который проводит многие фундаментальные и прикладные научные исследования, оставаясь основным техническим и научным партнером и генеральным проектировщиком АК «АЛРОСА» (ПАО) на протяжении всего срока функционирования Компании и являясь основным крупнейшим исследовательским центром по разработке технологий алмазодобычи [22]. На текущий момент основным вектором развития института является проведение научно-исследовательских работ, направленных на технологическую эффективность ведения горных работ, цифровизацию горного производства и экологическую безопасность производственных объектов. Большой объем разноплановых научных исследований проектного института «Якутинипроалмаз» решает множественные задачи по эффективной разработке кимберлитовых трубок, обеспечивая устойчивое развитие текущих горных работ. Высокую актуальность возникающих технических задач можно обосновать большим числом горных

производств – активных карьеров и рудников, а также сложными природными и горно-геологическими условиями разработки. В современных условиях, когда именно мировой алмазный рынок является определяющим, необходима постоянная корректировка объема добываемой руды, что в свою очередь является необходимым следствием для процессов модернизации очистных блоков рудников и карьеров. Выполнение данных работ позволит в конечном итоге обеспечивать высокую конкурентоспособность функционирующего горнодобывающего предприятия в непредсказуемых условиях постоянно изменяющихся цен и плавающей структуре затрат [1].

В то же самое время высокую конкурентоспособность горнодобывающего объекта можно обеспечить за счёт гибкого и своевременного изменения порядка и направления развития горных работ. Контроль над изменением размеров рабочей зоны и конструкции очистных блоков при заданных технологических параметрах позволяет при существующих и технических ограничениях обеспечивать оперативное выполнение потребностей получателя продукции. Именно вышеупомянутые процессы и прочие другие (совершенствование карьерного и шахтного транспорта, оптимизация технологических схем разработки, формирование новых конфигураций процессов ведения горных работ и пр.) позволяют в итоге АК «АЛРОСА» (ПАО) оставаться лидером на рынке добычи алмазного сырья.

Большим достижением научного института «Якутинипроалмаз» можно считать создание технологии доработки глубоких карьеров, которая позволяет применить крутонаклонные съезды для дальнейшей доработки карьера [23, 24]. Данная технология сильно изменила особенности ведения открытых горных работ, позволив ощутимо снизить объем вскрышных пород и увеличить максимально рациональную предельную глубину отработки карьера.

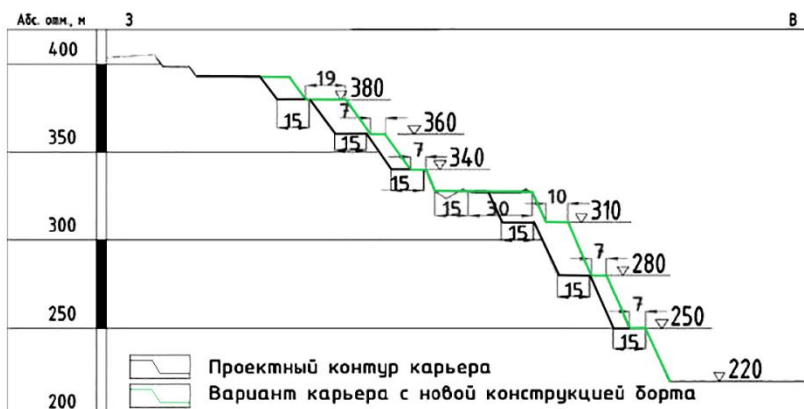


Рис. 3. Вариант отработки карьера [23]

Fig. 3. Quarry development option [23]

Однако в алмазной горнодобывающей промышленности на территории России в начале XXI в. возникали определенные проблемы. Внедрение новых технологических решений и ввод в промышленную

эксплуатацию инновационной техники были резко ограничены ввиду существования ряда устаревших нормативных документов, таких как СНиПы, ВНТП, пунктов правил промышленной безопасности и т. п.,

которые практически не изменялись с 80-х гг. XX в. После десятка лет законодательской работы промышленных комиссий, к 2021 г., данная проблема практически не имеет веса, так как нормативная база РФ была сильно переработана и приведена в соответствие с общемировыми стандартами и практиками. Ярким примером может служить разработка национального стандарта, который функционирует на текущий момент, «Разработка алмазорудных месторождений открытым способом в криолитозоне», который напрямую относится к ведению горных работ на алмазоносных месторождениях АК «АЛРОСА» [25].

Институт «Якутнипроалмаз» одним из первых научных организаций предложил внедрить технологии камерных систем разработки с применением закладки для подземного рудника «Айхал», что позволило снизить себестоимость добычи одной тонны руды приблизительно на 11 % по сравнению со слоевы-

ми системами разработки [26, 27]. В то же время геомеханическим обоснованием отдельно было установлено безусловное и очевидное превосходство слоевой нисходящей системы разработки, которая предполагала применение камерно-целикового порядка выемки с применением закладочных работ по устойчивости конструктивных элементов технологии над другими камерными системами разработки при ведении подземных горных работ на руднике «Интернациональный» [28, 29].

Силами сотрудников института были проведены научные работы по обоснованию конструктивных элементов и основных параметров системы разработки с блоковым самообрушением применительно к условиям месторождения трубки «Удачная» [30–32]. Данные работы позволили заявить о возможности применения технологий с массовым обрушением руды и вмещающих пород в условиях Крайнего Севера.

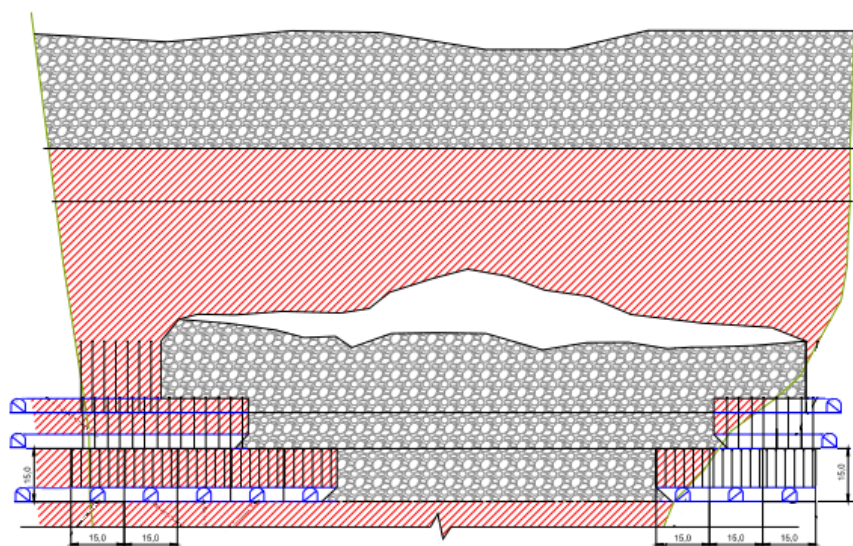


Рис. 4. Вариант системы разработки с самообрушением руды, рудник «Удачный» [33]

Fig. 4. Variant of the block caving mining method, «Udachny» mine [33]

Освоение кимберлитовой трубки «Удачная» осуществляется подземным способом с применением высокопроизводительных систем разработки с обрушением руд – на первом этапе отработки месторождения применяется этажная система разработки с принудительным обрушением и площадным выпуском руды, а в дальнейшем, на втором этапе, планируется перейти к этажному самообрушению руды [34–38]. Данные системы разработки в конечном результате имеют низкую себестоимость добычи руды, а также позволяют обеспечить большие объемы добычи горной массы [39, 40], что в совокупности позволяет экономически эффективно извлекать полезное ископаемое для его дальнейшей обработки на обоганительной фабрике № 12 Удачинского ГОКа. Во время мировой пандемии рудник «Удачный» оказался в числе тех, кто не снизил, но, наоборот, увеличил объем добычи до 4 млн т горной массы в год [5, 20].

Из наиболее новых работ важно отметить создание проекта «Концепция возобновления добычных работ на месторождении трубки «Мир». Выполненная ра-

бота послужила основой для последующей разработки документа «Технологический регламент на вскрытие и разработку запасов месторождения трубки «Мир», который на текущий момент находится на завершающей стадии утверждения. На текущий момент обоснованы и выбраны места заложения вскрывающих вертикальных стволов, были пробурены контрольно-стволовые скважины, идет активный поиск вариантов камерной системы разработки с последующей закладкой выработанного пространства [26].

Также были найдены решения и технологически обоснована отработка подкарьерных запасов под обводнённой массой осыпей и поддержании бортов карьера в устойчивом состоянии путём формирования льдопородного искусственного массива в карьере «Интернациональный» с использованием атмосферного холода [41].

Для африканского подразделения АК «АЛРОСА» был разработан комплекс технических решений, позволяющих отработать кимберлитовую трубку «Каток» подземным способом с применением массовых си-

стем с обрушением руд. По результатам выполненных технико-экономических расчётов удалось подтвердить обоснованность данных решений как с экономической точки зрения, так и с точки зрения конструктивных технологических оценок [22, 42]. Ожидается, что в ближайшие годы ещё один подземный рудник будет введен в строй на африканском континенте.

Другой крупный научный институт – Институт Горного дела Уральского отделения Российской Академии Наук (ИГД УрО РАН) – активно проводит свою научную деятельность в области изучения технологий добычи алмазного сырья. Силами сотрудников научного института были сформулированы и предложены к внедрению различные эффективные технологии, направленные на развитие алмазодобывающей промышленности в XXI в. По мнению руководства института, общая направленность проводимых научно-исследовательских работ по горной тематике полностью определяется изменением и состоянием сырьевой базы АК «АЛРОСА» (ПАО), которая на текущий момент обусловлена комплексным переходом ведения горных работ от открытого способа разработки на подземный, что позволяет увеличить срок отработки кимберлитовых алмазоносных тел. Подземные горные работы в целом имеют показатели добычи более низкие, чем открытая разработка. Также продолжается вовлечение в отработку месторождений полезных ископаемых более бедных, удаленных и маломасштабных, что становится возможным благодаря новым технологиям разработки и переработки георесурсов [25, 42–45].

Сотрудники ИГД УрО РАН предложили и обосновали к внедрению комплексную технологию разработки прибортовых и подкарьерных запасов алмазоносных месторождений с применением систем разработки с обрушением руд, которые способны обеспечить высокую безопасность и эффективность горных работ. Применение систем разработки с обрушением руд позволяют достигнуть высокой производительности в 4 млн т горной массы в год. Сотрудниками научного института удалось разработать и обосновать комплекс технологических операций в условиях наличия в рудном массиве карстов, высокой обводненности и газов, что обеспечит бесперебойную работу рудника и его безопасное функционирование [46]. Данные технологии были успешно опробованы и внедрены на руднике «Удачный». В процессе функционирования рудника «Удачный» была рекомендована к применению рациональная конструкция траншейного днища при ведении горных работ с обрушением руд и с применением площадного выпуска руды. Данная конструкция позволяет наиболее полно обеспечить сохранность выпускных горных выработок подэтажа на протяжении всего необходимого периода службы горной выработки, а также позволяет контролировать приемлемый уровень разубоживания и потерь полезного ископаемого [46]. Данная технология позволяет на текущий момент руднику достигать и удерживать высокую годовую производственную мощность. Ещё одной важной и инновационной технологией для ведения подземных горных работ явля-

ется обоснование минимально безопасной мощности (высоты) предохранительного рудопородного подвижного массива (предохранительной подушки). Данная предохранительная подушка сформирована для обеспечения необходимой защиты и изоляции подземных горных работ от влияния атмосферы (открытого пространства карьера), её работа обеспечивается при внедрении систем разработки с самообрушением руды и с принудительным обрушением руды. Сотрудниками ИГД УрО РАН были проведены научные работы по формированию различных способов создания предохранительной подушки, в т. ч. был выполнен комплексный анализ процессов влияния предохранительной подушки и её наличия над горными работами на общую эффективность добычи руды, были разработаны технические мероприятия и рекомендации по выпуску руды, которые позволяют обеспечить поддержание необходимой мощности предохранительной подушки в процессе отработки запасов I очереди отработки до отм. –680 м [47].

Обсуждение результатов деятельности научных институтов

Стоит отметить, что внедрение системы разработки с обрушением руды для алмазоносных рудных тел вертикального и субвертикального заложения не является абсолютно революционной технологией и неизученным в мировой среде вопросом – апробация данных технологий проходила на многих кимберлитовых рудниках других стран [48–51], где перед завершением открытых горных работ вставал вопрос перехода к разработке подземной части месторождения. Данные предохранительные подушки позволяют обеспечить защиту от падения кусков горной породы, защиту от ударно-воздушных волн, вызванных этим падением, а также защищают атмосферу рудника от прямой аэродинамической связи с карьером.

Важным уточнением будет являться и то, что при разработке кимберлитовой трубки «Удачная» были впервые опробованы и внедрены различные инновационные схемы и технологии, применяемые впервые для условий Крайнего Севера. Обоснованием этого можно считать крайне сложные горно-геологические условия разработки, что усложняет процессы ведения подземных горных работ. Ключевой особенностью ведения подземных горных работ на руднике «Удачный» является то, что рудное тело разделяется на два близкорасположенных самостоятельных массива, отработка которых ведется параллельно, с взаимным влиянием друг на друга. Соответственно, важно отметить то, что и подвижных предохранительных массивов также два, что усложняет процессы одновременного контроля и мониторинга за состоянием движения предохранительных подушек [52–54].

Система разработки на руднике, которая включает в себя применение одностадийной выемки и принудительного обрушения горных пород с площадным выпуском руды, состоит из следующих конструктивных элементов системы разработки: доставочные и выпускные штреки с проходкой отрезных восстающих, транспортные орты, расположенные между руд-

ными телами, и погрузочные заезды на подэтаж. На начальном этапе ведения очистных работ происходит отгрузка только части отбитой руды, горная масса подэтажа остается в подземном пространстве рудника и формирует рудную предохранительную подушку, которая в дальнейшем при понижении фронта ведения очистной выемки будет обеспечивать безопасное функционирование рудника. Процент выпуска руды из блока обосновывается глубиной ведения горных работ и мощностью подушки. В плане рудное тело разбивается на панели для отработки бесцеликовым методом, который обосновывает сплошной порядок

выемки запасов на подэтаже. Защитные целики формируются и остаются только над выработками выпуска горной массы, в дальнейшем их погашают при выемке нижележащего подэтажа.

При отбойке полезного ископаемого при данной системе разработки будет присутствовать постоянный боковой контакт руды с обрушенными породами, контроль за ведением процессов выпуска в данном случае будет являться важной научно-практической задачей, а контроль за сдвижением вышележащей предохранительной подушки позволяет обеспечивать безопасное функционирование рудника «Удачный».

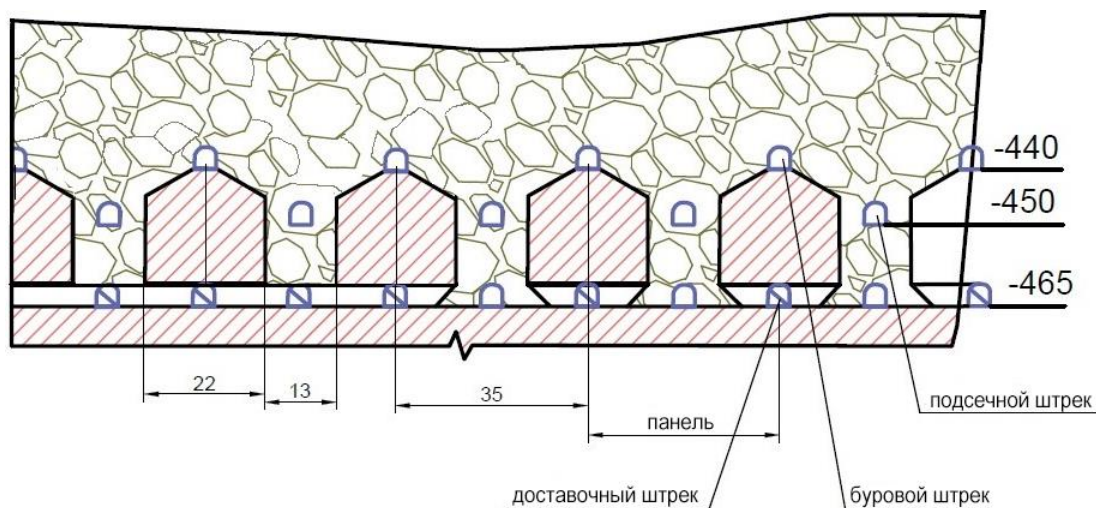


Рис. 5. Вариант системы разработки с обрушением руды, рудник «Удачный» [55]

Fig. 5. Variant of the caving mining method, «Udachny» mine [55]

Современные инновационные научно-исследовательские проекты

Для решения новых технических вызовов по эффективной отработке алмазоносных месторождений необходима цифровизация горного производства. Без внедрения элементов технологий программы «Индустрия 4.0» невозможно выстроить гибкую систему горного производства, которая позволяет функционировать на крайне неустойчивом рынке алмазной добычи [22, 56].

В настоящее время АК «АЛРОСА» осуществляет и внедряет научно-практический проект «Модернизация комплексной системы автоматизированного проектирования» [22]. Применение BIM-технологий является современным и передовым решением в горной отрасли, предполагающим комплексную обработку в трёхмерном представлении всей архитектурно-строительной, конструкторской, технологической, экономической и иной информации о любом производственном или непроизводственном объекте. В качестве перспективных направлений развития планируется:

- создать информационные цифровые двойники ГОКов и прочих объектов АК «АЛРОСА»;
- внедрить технологии лазерного сканирования (с помощью ЛИДАР-систем).

Внедрение BIM-технологий для объектов АК «АЛРОСА» можно разделить на два основных этапа

разработки. Первый этап – создание информационных моделей новых объектов. На данном этапе происходит создание информационной модели с нуля и последующая ее передача в управление капитального строительства Компании. По результатам строительства и/или ведения работ в информационную модель вносится окончательное текущее состояние, и она передается в эксплуатирующую организацию для отслеживания работоспособности объекта, планирования предупредительных и капитальных ремонтов. Второй этап – создание информационных моделей существующих объектов. На данном этапе планируется проведение объемных обмерочных работ при помощи лазерного сканирования действующих объектов с целью формирования актуальной информационной модели.

Создание цифровой модели рудника/карьера/ГОКа позволит более точно, гибко и более эффективно управлять горным производством, что даст возможность внедрять более сложные системы разработки, планируя цикл горной добычи таким образом, чтобы дать максимальный эффект для предприятия. Данные технологии уже зарекомендовали себя на других объектах алмазодобычи. Так, для рудника «Argyle» компании Rio Tinto был внедрен в эксплуатацию цифровой двойник, что позволило более эффективно изменять и контролировать весь цикл горной добычи [2].

Отдельными компонентами, тесно связанными с технологиями отработки кимберлитовых трубок, являются технические решения в области геотехнического обеспечения разработки месторождений. Так, для кимберлитовой трубки «Удачная» были выполнены комплексы работ по натурному исследованию. Данными исследованиями были получены численные значения тектонических напряжений в массиве горных пород. Дополнительно были определены модули деформации массивов горных пород трубки «Удачная». При проведении данных работ была применена новая методика натурных замеров участков породного массива с помощью спутниковых измерений смещений реперных пунктов (системы Глонасс и GPS) в карьере «Удачный». Дополнительно к вышеперечисленному была учтена пространственно-временная изменчивость полей напряжений и деформаций горного массива. Данная изменчивость была обусловлена блочно-иерархической структурой массива, а также его разномодульностью на различных участках исследуемого массива [57, 58]. После проведения натурных исследований авторами были определены итоговые численные значения напряженно-деформированного состояния горного массива подземного рудника им. Ф.Б. Андреева «Удачный». На основании результатов исследований специалистами были подготовлены материалы по обоснованию геомеханических условий подземной разработки кимберлитовой трубки «Удачная» при переходе к подземным горным работам. Данные работы позволили уточнить и скорректировать процессы отработки трубки «Удачная» системами разработки с обрушением руд. Данные работы невозможно было провести без тесного сотрудничества служб геомеханического мониторинга рудника и профильных научных институтов. Ранее было указано, что для условий подземного рудника «Удачный» крайне важную роль играет напряженно-деформированное состояние горных массивов – контроль над их состоянием и сдвижением является важным технологическим процессом, который круглосуточно осуществляет служба геомеханического мониторинга на Удачинском горно-обогатительном комбинате (УГОК) [59]. В этом случае обеспечение безопасной подземной отработки кимберлитовых рудных тел становится задачей, решение которой позволит сформировать базу для устойчивого развития подземных горных работ и безопасной полной отработки кимберлитовых рудных тел на протяжении срока службы всего рудника.

Отдельного упоминания заслуживают крупные научные работы в области технологии проведения буровзрывных работ на месторождениях Крайнего Севера [60]. Исследователями была проведена научно-техническая работа под названием «Обоснование методики расчета и разработка нормативов буров-

взрывных работ для карьеров алмазодобывающих предприятий РФ, расположенных в криолитозоне» [61]. В этой работе был выполнен глубокий анализ теоретических, а также научно-практических исследований, посвященных процессам разрушения неограниченных алмазов во время взрывного нагружения массивов горных пород. Были обоснованы технологии управления процессами трещинообразования в природных кристаллах алмазов, были предложены процессы минимизации повреждений алмазов при взрывах. Данными работами были обоснованы нормативы ведения буровзрывных работ для расположенных в криолитозоне алмазодобывающих карьеров. В дальнейшем была внедрена к промышленному применению таблица категорий горных пород по удельному расходу взрывчатых веществ, что позволило обосновать рациональные параметры изменения буровзрывных работ в условиях Крайнего Севера [61].

Заключение

Наработанный опыт и большое количество научных исследований, проведенных силами ведущих научных коллективов России, направленных на развитие технологий разработки алмазоносных месторождений, неопределимы, благодаря этим работам удается давать ответы на многие актуальные вопросы, касающиеся эффективной разработки месторождений, расположенных в районах Крайнего Севера. На текущий момент можно с уверенностью говорить о том, что весь объем научных исследований, посвященных развитию алмазоносной добычи, крайне высок. Российское содружество горной промышленности и горной науки позволяет сообща решать самые сложные проблемы, возникающие перед горнодобывающими компаниями, которые осваивают труднодоступные и удаленные месторождения России. Сегодняшние совместные усилия научных организаций фокусируются на поиске технических решений по эффективному, малозатратному и высокопроизводительному извлечению минерального сырья. Основные проблемы, возникающие в ходе активной отработки алмазоносных месторождений, такие как загазованность, обводненность, предельные глубины разработок, неустойчивость горного массива, низкое содержание полезного компонента в руде, решаются совместными усилиями ведущих научных институтов России. Проводимые научные работы позволяют внедрять на алмазодобывающих предприятиях комплексы разработанных технических решений, составляющих совокупность основных и вспомогательных технологических процессов, которые обеспечивают повышение устойчивости добычи алмазной продукции и более полное использование минеральных ресурсов, находящихся в разработке крупнейших алмазодобывающих компаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Global Diamond Industry 2020–21 / O. Linde, O. Geyler, A. Epstein, K. Rentmeesters // Bain & Company. 2021. URL: <https://www.bain.com/link/4f87f921c98d42eb934c61efa4d6c4f9.aspx> (дата обращения 05.08.2022).

2. Jacques J.-S., Thompson S. Rio Tinto full year results 2019. – England: Rio Tinto, 2019. – 54 p.
3. Cleaver C. The diamond insight report 2019. – England: De Beers UK LTD, 2019. – 56 p.
4. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на 2022 год и на плановый период 2023 и 2024 годов.

- Министерство экономического развития Российской Федерации. 2021. URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/d7f5f5d4ea44bd4c30d42aac04cc1fca/prognoz_socialno_ekonom_razvitiya_rf_2022-2024.pdf (дата обращения 05.08.2022).
5. Иванов В.В., Стасенко А.В. Ежеквартальный отчет за 2 квартал 2021 г. АК «АЛРОСА» (ПАО). 2021. URL: <http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2021/08/2-%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0%D0%BB2021%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%D1%8D%D0%BC%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0.pdf> (дата обращения 05.08.2022).
 6. The Kimberley Process Rough Diamond Statistics. URL: https://kimberleyprocessstatistics.org/public_statistics (дата обращения 05.08.2022).
 7. Foley S.F., Yaxley G.M., Kjarsgaard B.A. Kimberlites from source to surface: insights from experiments // *Elements*. – 2019. – V. 15. – P. 393–398.
 8. Giuliani A., Pearson D.G. Kimberlites: from deep earth to diamond mines // *Elements*. – 2019. – V. 15. – P. 377–380.
 9. A review of the mineral potential of Liberia / A.G. Gunn, J.K. Dorbor, J.M. Mankelov, P.A.J. Lusty, E.A. Deady, R.A. Shaw, K.M. Goode-nough // *Ore Geology Review*. – 2018. – V. 101. – P. 413–431.
 10. Petrogenesis of a hybrid cluster of evolved kimberlites and ultramafic lamprophyres in the Kuusamo area, Finland / H. Dalton, A. Giuliani, H. O'Brien, D. Phillips, J. Hergt, R. Maas // *Petrol Journal*. – 2019. – V. 60. – P. 2025–2036.
 11. Geology of the Renard kimberlite pipe, Québec, Canada / M. Gaudet, C. Muntener, M. Kopylova, V. Zhuk, C. Nathwani // *Mineral Petrol*. – 2018. – V. 112. – P. 433–445.
 12. Olson D.W. Mineral commodity summaries 2022. – Reston: U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2022. – 206 p.
 13. Mazakov E.B., Matrokhina K.V., Trofimets V.Y. Traffic management at the enterprises of the mineral industry // *Advances in raw material industries for sustainable development goals*. – London: CRC Press, 2021. – 528 p.
 14. Kjarsgaard B.A., Januszczak N., Stiefenhofer J. Diamond exploration and resource evaluation of kimberlites // *Elements*. – 2019. – V. 15. – P. 411–416.
 15. The discovery of the Argyle pipe, Western Australia: the world's first lamproite hosted diamond mine, Australia / C.B. Smith, W.J. Atkinson, E.W. Tyler, A.E. Hall, I. Macdonald // *Geoscience and exploration of the Argyle, Bunder, Diavik and Murowa diamond deposits* – 2018. – V. 20 – P. 49–64.
 16. Зубов В.П., Куанг Ф.Л. Разработка ресурсосберегающей технологии выемки пологих угольных пластов с труднообрушающимися породами кровли (на примере шахт Куангинского угольного бассейна) // *Записки Горного института*. – 2022. – Т. 257. – С. 795–806.
 17. Григорьева Е.Э., Сентизова Н.Р. Входные барьеры и перспективы развития технологии блокчейн в алмазной индустрии и России // *Цифровая экономика и индустрия 4.0: тенденции 2025*. – СПб, 2019 – С. 147–152. DOI: 10.18720/IEP/2019.1/20
 18. Evaluation of mining-induced energy and rockburst prediction at a diamond mine in Canada using a full 3D elastoplastic finite element model / M. Sepehri, B.A. Derek, A. Samer, P. Leveille, R.A. Hall // *Engineering geology*. – 2019. – P. 15–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105457>
 19. Lépine I., Farrow D. 3D geological modelling of the Renard kimberlite pipe, Québec, Canada: from exploration to extraction // *Mineralogy and Petrology*. – 2018. – V. 112. – P. 411–419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00710-018-0567-x>
 20. Иванов С.С. Годовой отчет 2020 ПАО «АЛРОСА». АК «АЛРОСА» (ПАО). 2021. URL: <http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2021/08/2-%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0%D0%BB2021%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%D1%8D%D0%BC%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0.pdf> (дата обращения 05.08.2022).
 21. Егорова И.В., Михайлов Б.К. Объектный метод анализа обеспеченности запасами полезных ископаемых на примере России // *Руды и металлы*. – 2021. – Т. 4. – С. 6–21. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10025.
 22. Чаадаев А.С., Зырянов И.В., Бондаренко И.Ф. Институту Якутии про алмаз – 50 лет. История и перспективы // *Журнал «Горная Промышленность»*. – 2010. – Т. 6 (94). – С. 6–12.
 23. Развитие технологии проходки и формирования на карьере транспортных съездов крутого уклона / А.Н. Акишев, С.Л. Бабаскин, А.А. Кожемякин, Р.В. Никитин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2013. – Т. 12. – С. 58–64.
 24. Гендлер С.Г., Борисовский И.А. Управление аэродинамическими процессами при разработке золоторудных месторождений открытым способом // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2021. – Т. 2. – С. 99–107. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107.
 25. Современные технологии при добыче и переработке алмазо-содержащего сырья / М.Р. Айгистов, Е.Н. Герасимов, И.Ф. Бондаренко, И.В. Зырянов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – Т. 5-2. – С. 6–21. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_2_0_6
 26. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р. Разработка алмазородных месторождений открытым способом в криолитозоне. Требования к проектированию. – М.: Стандартинформ, 2018. – 156 с.
 27. Чаадаев А.С., Зырянов И.В., Бондаренко И.Ф., Состояние и перспективы развития горнообогатительных технологий на алмазодобывающих предприятиях АК «Алроса» (ПАО) // *Горная промышленность*. – 2017. – Т. 2. – С. 6–13.
 28. Холмский А.В., Фомин С.И. Обоснование применения технологической схемы безвзрывной отработки на удароопасных бокситовых месторождениях с отбойкой гидромолотами // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 7. – С. 40–54. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_40.
 29. Никитин И.В. Оптимизация параметров вскрытия при подземной разработке подкарьерных запасов кимберлитового месторождения // *Проблемы недропользования*. – 2017. – № 1. – С. 21–28.
 30. Zuev B.Yu., Zubov V.P., Fedorov A.S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals // *Eurasian mining* // 2019. – V. 1. – P. 8–12. DOI: 10.17580/em.2019.01.02
 31. Герасимов Е.Н., Зырянов И.В., Коваленко Е.Г. Институт Якутии про алмаз: результаты, достижения, планы // *Горный журнал*. – 2021. – Т. 2. – С. 39–47.
 32. Tishkov M. Evaluation of caving as a mining method for the Udachnaya underground diamond mine project // *Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*. – Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2018. – P. 835–846. DOI: 10.36487/ACG_rep/1815_66.Tishkov
 33. Коваленко А.А., Русских И.Л. Совершенствование технологии отработки запасов трубки «Удачная» с применением систем разработки с самообрушением руды // *V Международная научно-техническая конференция «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений»*. – Екатеринбург, Уральский государственный горный университет, 2016. – С. 69–82.
 34. Соколов И.В., Антипин Ю.Г. Инновационные технологии подземной разработки рудных месторождений // *Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья: Международная научно-практическая конференция*. – Екатеринбург, 2019. – С. 27–31.
 35. Петрова Л.В., Николаев В.В. Выбор оптимального варианта системы с самообрушением и формы подсечки для условий трубки «Удачная» // *Инновации. Наука. Образование*. – 2021. – Т. 36. – С. 1451–1460.
 36. Опыт разработки инновационных подземных геотехнологий освоения рудных месторождений / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, Н.В. Гобов, И.В. Никитин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. – Т. 3-1. – С. 338–350.
 37. Зубов В.П., Антонов А.А. Пример реализации комбинированной системы разработки с самообрушением руды на участке богатых железных руд // *Записки Горного института*. – 2006. – Т. 168. – С. 211–214.
 38. Sainsbury B. A sub-level caving algorithm for large-scale, small-strain, numerical simulations // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2019. – V. 52. – P. 289–295.
 39. Shellsell K.J., Labrecque P.O., Morrison D.M. Increasing productive capacity in block caving mines // *Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*. – Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2018. – P. 107–118.

- URL: https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1815_05_Morrison (дата обращения 05.08.2022).
40. Соколов И. В., Антипин Ю. Г., Никитин И. В. Принципы формирования и критерий оценки геотехнологической стратегии освоения переходных зон рудных месторождений подземным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – Т. 9. – С. 151–160.
 41. Evaluation of the AKI diamond deposit, Western Australia, Australia / S. Roffey, M.J. Rayner, A.T. Davy, R.W. Platell // Geoscience and exploration of the Argyle, Bunder, Diavik and Murowa diamond deposits. – 2018. – V. 20. – P. 65–88.
 42. Монтянова А. Н., Ефимов А. И., Таланцев Л. П. К вопросу оптимизации технологии закладочных работ при комбайновой отбойке руды коренных алмазных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – Т. 2. – С. 343–353.
 43. Characteristics and origin of the mantle root beneath the Murowa diamond mine: Implications for craton and diamond formation, Australia / D. Pearson, J. Liu, C. Smith, K. Mather, M. Krebs, G. Bulanova, A. Kobussen // Geoscience and exploration of the Argyle, Bunder, Diavik and Murowa diamond deposits – 2018. – V. 20 – P. 403–424.
 44. Pierce M.P. Forecasting vulnerability of deep extraction level excavations to draw induced cave loads, China // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2018. – V. 11. – P. 1674–1755. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.07.006
 45. Sainsbury B., Kuruçuk N. Impact of intact rock properties on proneness to rock bursting // Bulletin of engineering geology and the environment. – 2020. – V. 79. – P. 1939–1946.
 46. Рациональная конструкция траншейного днища для выпуска руды при отработке переходной зоны подземного рудника «Удачный» / И. В. Соколов, А. А. Смирнов, Ю. Г. Антипин, К. В. Барановский // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – Т. 1. – С. 106–117. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/43c/43c98ee87229713187f336ee64ec8d.pdf> (дата обращения 05.08.2022).
 47. Обоснование толщины предохранительной подушки при отработке подкарьерных запасов трубки «Удачная» системами с обрушением / И. В. Соколов, А. А. Смирнов, Ю. Г. Антипин, И. В. Никитин, М. В. Тишков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – Т. 2. – С. 52–62. DOI: 10.15372/FTPRP120180207
 48. Underground mining at Ekati and Diavik diamond mines / J. Jakubec, D. Legace, B. Boggis, L. Clark, P. A. Lewis // Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving. – Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2018. – P. 73–88.
 49. The Bunder Diamond Project, India: geology, geochemistry, and age of the Saptarshi lamproite Pipes / H. Das, A.F. Kobussen, K.J. Webb, D. Phillips, R. Maas, A. Soltys, M.J. Rayner, D. Howell // Geoscience and exploration of the Argyle, Bunder, Diavik and Murowa diamond deposits – 2018. – V. 20. – P. 201–222.
 50. Pearson D., Giuliani A. Kimberlites: from deep earth to diamond mines // Elements. – 2019. – Т. 15. – P. 377–380.
 51. Авдеев А. Н., Зотеев О. В., Сосновская Е. Л. Прогноз развития геомеханической ситуации при переходе от открытой к подземной технологии выемки крутопадающей залежи системами с обрушением горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – Т. 5-2. – С. 6–15. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_2_0_6.
 52. Киселев В. В., Хохолов Ю. А. К вопросу возведения, эксплуатации и обеспечения подвижности породных предохранительных подушек при подземной доработке подкарьерных запасов алмазосодержащих трубок в условиях криолитозоны // Евразийское научное объединение. – 2019. – № 11-2 (57). – С. 1–4.
 53. Половов Б. Д., Волков Д. В. Геотехнический мониторинг горнотехнических сооружений в системе оценки и обеспечения качества геомеханических решений // Известия Уральского государственного горного университета. – 2020. – Т. 2-58. – С. 139–160. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-2-139-160.
 54. Pu Y., Apel D.B., Xu H. Rockburst prediction in kimberlite with unsupervised learning method and support vector classifier // Tunneling and Underground Space Technology. – 2019. – V. 90. – P. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.04.019>
 55. Zubov V.P., Anisimov K.A. Substantiation of the method ensuring the safe development of the pit reserves of kimberlite ore deposits in the conditions of the Удачный mine // E3S Web of Conferences. – 2021. – P. 101–112.
 56. Cherepovitsyn A., Solovyova V. Prospects for the development of the Russian rare-earth metal industry in view of the global energy transition // A Review. Energies. – 2022. – V. 15. – P. 387–342. DOI: 10.3390/en15010387
 57. Balek A., Sashourin A. In-situ rock mass stress-state measurements in scales of mineral deposits: problem-solving // E3S Web of Conferences. – 2018. – P. 56:02004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185602004> (дата обращения 05.08.2022).
 58. Hoek E., Brown E.T. The Hoek–Brown failure criterion and GS // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2018. – V. 11-3. – P. 445–463. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.001
 59. Геотермический контроль грунтов основания копров и устьевой части вертикальных стволов на примере алмазодобывающего рудника «Удачный» (Якутия) / А. С. Курилко, Ю. А. Хохолов, А. В. Дроздов, Д. Е. Соловьев // Криосфера Земли. – 2017. – Т. 21. – С. 82–91.
 60. Controls on the explosive emplacement of diamondiferous kimberlites: new insights from hypabyssal and pyroclastic units in the Diavik mine, Canada / M. Tovey, A. Giuliani, D. Phillips, S. Moss // Lithos. – 2020. – V. 360. – P. 105–110.
 61. О разработке нормативов проектирования буровзрывных работ в условиях алмазодобывающих карьеров, расположенных в криолитозоне / С. Н. Жариков, В. Г. Шеменев, И. В. Зырянов, И. Ф. Бондаренко, В. И. Хон // Рациональное освоение недр. – 2017. – Т. 1. – С. 56–60.

Поступила 14.09.2022 г.

Прошла рецензирование 22.09.2022 г.

Информация об авторах

Анисимов К.А., аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета.

Никифоров А.В., кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 622.014.1

MODERN TECHNOLOGIES OF THE DEVELOPMENT OF DIAMONDFEROUS DEPOSITS

Kirill A. Anisimov¹,
anisimov.kirill.95@list.ru

Aleksandr V. Nikiforov¹,
nikiforov_av@pers.spmi.ru

¹ St. Petersburg Mining University,
2, 21-liniya V.O., St. Petersburg, 190106, Russia.

The relevance of this work is to combine and generalize the experience of open pit and underground mining and the use of modern science-intensive technologies for the cost-effective development of diamondiferous mineral deposits in the Far North of Russia. The analysis carried out in this scientific article allows us to give an objective assessment of the mining industry development in the field of mining operations in diamondiferous mineral deposits and introduction of modern highly efficient technologies for deposits with difficult development conditions in permafrost zones.

The main aim of the research is analysis of modern science-intensive technologies for the development of diamondiferous mineral deposits located in permafrost zones.

Objects: vertical and subvertical diamondiferous ore bodies located in permafrost zones.

Methods: evaluation and analysis of the experience of conducting open and underground mining, located in permafrost zones, synthesis and generalization of materials, sources and data that are in the public domain, as well as modern highly efficient science-intensive technologies for the development of diamondiferous mineral deposits in the climatic regions of the Far North.

Results. This article identified the main problems that arise during the mining of kimberlite ore bodies located in permafrost zones. The authors presented and substantiated conclusions on the further effective use of optimal technological schemes for open and underground mining of kimberlite ore bodies, which allow ensuring high security in mining operations, additional economic efficiency and flexibility of production technology when mining kimberlite ore bodies in the Far North.

Key words:

Ore deposits, drilling and blasting, diamonds, diamond mining, underground operations, open pit operations, diamond market, BIM technologies, digitalization, kimberlite pipe, safety cushion, underground reserves.

REFERENCES

- Linde O., Geyler O., Epstein A., Rentmeesters K. The Global Diamond Industry 2020–21. *Bain & Company*, 2021. Available at: <https://www.bain.com/link/4f87f921c98d42eb934c61efa4d6c4f9.a.spx> (accessed 5 August 2022).
- Jacques J.-S., Thompson S. *Rio Tinto Interim Results 2019*. England, Rio Tinto, 2019. 54 p.
- Cleaver C. *The diamond insight report 2019*. England, De Beers UK LTD, 2019. 56 p.
- Prognoz sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na 2022 god i na planovy period 2023 i 2024 godov. Ministerstvo Ekonomicheskogo Razvitiya Rossiyskoy Federatsii. 2021* [Forecast of the socio-economic development of the Russian Federation for 2022 and for the planned period of 2023 and 2024, 2021. Ministry of Economic Development of the Russian Federation]. Available at: https://www.economy.gov.ru/material/file/d7f5f5dea44bd4c30d42aac04cc1fca/prognoz_sotsialno_ekonom_razvitiya_rf_2022-2024.pdf (accessed 5 August 2022).
- Ivanov V.V., Stasenkov A.V. *Ezhekvaralniy otchet za 2 kvartal 2021 g. AK «ALROSA» (PAO). 2021* [PJSC ALROSA quarterly report for the 2nd quarter of 2021, 2021. AK ALROSA (PJSC)]. Available at: <http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2021/08/2-%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0%D0%BB2021%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82-%D1%8D%D0%BC%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0.pdf> (accessed 5 August 2022).
- The Kimberley Process Rough Diamond Statistics*. Available at: https://kimberleyprocessstatistics.org/public_statistics (accessed 5 August 2022).
- Foley S.F., Yaxley G.M., Kjarsgaard B.A. Kimberlites from source to surface: insights from experiments. *Elements*, 2019, vol. 15, pp. 393–398.
- Giuliani A., Pearson D.G. Kimberlites: from deep earth to diamond mines. *Elements*, 2019, vol. 15, pp. 377–380.
- Gunn A.G., Dorbor J.K., Mankelov J.M., Lusty P.A.J., Deady E.A., Shaw R.A., Goodenough K.M. A review of the mineral potential of Liberia. *Ore Geology Review*, 2018, vol. 101, pp. 413–431.
- Dalton H., Giuliani A., O'Brien H., Phillips D., Hergt J., Maas R. Petrogenesis of a hybrid cluster of evolved kimberlites and ultramafic lamprophyres in the Kuusamo area, Finland. *Petrol Journal*, 2019, vol. 60, pp. 2025–2036.
- Gaudet M., Muntener C., Kopylova M., Zhuk V., Nathwani C. Geology of the Renard kimberlite pipe, Québec, Canada. *Mineral Petrol*, 2018, vol. 112, pp. 433–445.
- Olson D.W. *Mineral commodity summaries 2022*. Reston, U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2022. 206 p.
- Mazakov E.B., Matrokhina K.V., Trofimets V.Y. Traffic management at the enterprises of the mineral industry. *Advances in raw material industries for sustainable development goals*. London, CRC Press, 2021. 528 p.
- Kjarsgaard B.A., Januszczak N., Stiefenhofer J. Diamond exploration and resource evaluation of kimberlites. *Elements*, 2019, vol. 15, pp. 411–416.
- Smith C.B., Atkinson W.J., Tyler E.W., Hall A.E., Macdonald I. The discovery of the Argyle pipe, Western Australia: the world's first lamproite hosted diamond mine, Australia. *Geoscience and exploration of the Argyle, Bunder, Diavik and Murowa diamond deposits*, 2018, vol. 20, pp. 49–64.
- Zubov V.P., Phuc L.Q. Development of resource-saving technology for excavation of flat-lying coal seams with tight roof rocks (on the example of the Quang Ninh coal basin mines). *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 257, pp. 795–806.
- Grigoryeva E.E., Sentizova N.R. Vhodnye barery i perspektivy razvitiya tekhnologii blokcheyn v almaznoy industrii i Rossii [Entry barriers and prospects for the development of blockchain technology in the Russian diamond industry]. *Tsifrovaya ekonomika i industriya 4.0: tendencii 2025* [Digital Economy and Industry 4.0: Trends 2025]. St-Petersburg, Saint-Petersburg polytechnic university Publ., 2019. pp. 147–152.
- Sepelri M., Derek B.A., Samer A., Leveille P., Hall R.A. Evaluation of mining-induced energy and rockburst prediction at a diamond mine in Canada using a full 3D elastoplastic finite element model. *Engineering geology*, 2019, pp. 15–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105457>

19. Lépine I., Farrow D. 3D geological modelling of the Renard kimberlite pipe, Québec, Canada: from exploration to extraction. *Mineralogy and Petrology*, 2018, vol. 112, pp. 411–419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00710-018-0567-x>
20. Ivanov S.S. *Godovoy otchet 2020 PAO «ALROSA». AK «ALROSA» (PAO). 2021* [Annual report 2020 of PJSC ALROSA. 2021. AK ALROSA (PJSC)]. Available at: <http://www.alrosa.ru/wpcontent/uploads/2021/08/2%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0%D0%BB2021%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%D1%8D%D0%BC%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0.pdf> (accessed 5 August 2022).
21. Egorova I. V., Mikhailov B. K. An object method for analyzing the availability of mineral reserves on the example of Russia. *Ores and metals*, 2021, vol. 4, pp. 6–21. In Rus. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10025.
22. Chaadaev A.S., Zyryanov I.V., Bondarenko I.F. The Yakutniproalmaz Institute is 50 years old. History and prospects. *Mining Industry*, 2010, vol. 6, no. 94, pp. 6–12. In Rus.
23. Akishev A.N., Babaskin S.L., Kozhemyakin A.A., Nikitin I.V. Development of technology for driving and forming steep slopes at the quarry. *Mining information and analytical bulletin*, 2013, vol. 12, pp. 58–64. In Rus.
24. Gendler S.G., Borisovsky I.A. Management of aerodynamic processes in the development of gold deposits by an open method. *Mining information and analytical bulletin*, 2021, vol. 2, pp. 99–107. In Rus. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107.
25. Aigistov M. R., Gerasimov E. N., Bondarenko I. F., Zyryanov I. V. Modern technologies in the extraction and processing of diamond-bearing raw materials. *Mining information and analytical bulletin*, 2022, vol. 5-2, pp. 6–21. In Rus. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_2_0_6
26. *GOST R 58148-2018. Razrabotkaalmazorudnykh mestorozhdeniy otkrytym sposobom v kriolitozone* [State Standard 58148-2018. Open pit mining of diamond ore deposits in permafrost]. Moscow, StandartInform Publ., 2018. 156 p.
27. Chaadaev A.S., Zyryanov I.V., Bondarenko I.F., Status and prospects for the development of mining and processing technologies at the diamond mining enterprises of PJSC Alrosa. *Mining Industry*, 2017, vol. 2, pp. 6–13. In Rus.
28. Kholmiskiy A.V., Fomin S.I. Substantiation of blast-free technology for mining rockburst-hazardous bauxite deposits using hydraulic breakers. *Mining information and analytical bulletin*, 2022, vol. 7, pp. 40–54. In Rus. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_40
29. Nikitin I.V. Optimization of stripping parameters during underground mining of underground kimberlite deposits. *Problems of subsoil use*, 2017, no. 1, pp. 21–28. In Rus.
30. Zuev B. Yu., V.P. Zubov, A.S. Fedorov. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals, Russia. *Eurasian mining*, 2019, vol. 1, pp. 8–12. In Rus.
31. Gerasimov E.N., Zyryanov I.V., Kovalenko E.G. Yakutniproalmaz Institute: results, achievements, plans. *Gorniy Zhurnal*, 2021, vol. 2, pp. 39–47. In Rus.
32. Tishkov M. Evaluation of caving as mining method for the Udachnaya underground diamond mine project. *Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Perth, Australian Centre for Geomechanics, 2018. pp. 835–846. DOI: 10.36487/ACG_rep/1815_66_Tishkov
33. Kovalenko A.A., Russkih I.L. Sovershenstvovanie tekhnologii otrabotki zapasov trubki "Udachnaya" s primeneniem sistem razrabotki s samoobrusheniem rudy [Improvement of the Udachnaya pipe reserves development technology using self-cave mining systems]. *V Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya. Innovatsionnye geotekhnologii pri razrabotke rudnykh i nerudnykh mestorozhdeniy* [V International Scientific and Technical Conference. Innovative geotechnologies in the development of ore and non-ore deposits]. Yekaterinburg, Ural State Mining University, 2016. pp. 69–82.
34. Sokolov I.V., Antipin Yu.G. Innovatsionnye tekhnologii podzemnoy razrabotki rudnykh mestorozhdeniy [Innovative technologies for underground mining of ore deposits]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya. Sovremennye tendentsii v oblasti teorii i praktiki dobychi i pererabotki mineralnogo i tekhnogennogo syrja* [International scientific and practical conference. Modern trends in the theory and practice of mining and processing of mineral and technogenic raw materials]. Yekaterinburg, JSC Uralmekhanobr, 2019. pp. 27–31.
35. Petrova L.V., Nikolaev V.V. The choice of the optimal variant of the system with self-collapse and the form of undercut for the conditions of the «Udachnaya» pipe. *Innovation. The science. Education*, 2021 vol. 36, pp. 1451–1460. In Rus.
36. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Gobov N.V., Nikitin I.V. Experience in the development of innovative underground geotechnologies for the development of ore deposits. *Mining information and analytical bulletin*, 2020, vol. 3-1, pp. 338–350. In Rus.
37. Zubov V.P., Antonov A.A. An example of the implementation of a combined mining system with ore self-caving in a rich iron ore area. *Notes of the Mining Institute*, 2006, vol. 168, pp. 211–214. In Rus.
38. Sainsbury B. A sub-level caving algorithm for large-scale, small-strain, numerical simulations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, vol. 52, pp. 289–295.
39. Shellsell K.J., Labrecque P.O., Morrison D.M. Increasing productive capacity in block caving mines. *Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Perth, Australian Centre for Geomechanics, 2018. pp. 107–115. DOI: https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1815_05_Morrison
40. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V. Principles of formation and criterion for evaluating the geotechnological strategy for the development of transitional zones of ore deposits by an underground method. *Mining information and analytical bulletin*, 2017, vol. 9, pp. 151–160. In Rus.
41. Roffey S., Rayner M.J., Davy A.T., Platell R.W. Evaluation of the AK1 diamond deposit, Western Australia, Australia. *Geoscience and exploration of the Argyle, Bunder, Diavik and Murowa diamond deposits*, 2018, vol. 20, pp. 65–88.
42. Montyanova A.N., Efimov A.I., Talantsev L.R. On the issue of optimizing the technology of stowing operations during combine breaking of ore from primary diamond deposits. *Mining information and analytical bulletin*, 2010, vol. 2, pp. 343–353. In Rus.
43. Pearson D., Liu J., Smith C., Mather K., Krebs M., Bulanova G., Kobussen A. Characteristics and origin of the mantle root beneath the Murowa diamond mine: Implications for craton and diamond formation, Australia. *Geoscience and exploration of the Argyle, Bunder, Diavik and Murowa diamond deposits*, 2018, vol. 20, pp. 403–424.
44. Pierce M.P. Forecasting vulnerability of deep extraction level excavations to draw induced cave loads. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, vol. 11, pp. 1674–1755. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.07.006>
45. Sainsbury B., Kurucuk N. Impact of intact rock properties on proneness to rockbursting. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 2020, vol. 79, pp. 1939–1946.
46. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Baranovsky K.V. Rational design of the trench bottom for the release of ore during the development of the transition zone of the underground mine "Udachny". *Physical and technical problems of mineral development*, 2013, vol.1, pp. 106–117. Available at: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/43c/43c98ee87229713187f336eece64ec8d.pdf> (accessed 5 August 2022).
47. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Tishkov M.V. Justification of the thickness of the safety cushion in the development of underground reserves of the Udachnaya pipe with caving systems. *Physical and technical problems of mineral development*, 2018, vol. 2, pp. 52–62. In Rus. DOI:10.15372/FTPRP120180207
48. Jakubec J., Legace D., Boggis B., Clark L., Lewis P.A. Underground mining at Ekati and Diavik diamond mines. *Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Perth, Australian Centre for Geomechanics, 2018. pp. 73–88.
49. Das H., Kobussen A.F., Webb K.J., Phillips D., Maas R., Soltys A., Rayner M.J., Howell D. The Bunder Diamond Project, India: Geology, geochemistry, and age of the Saptarshi lamproite Pipes, Australia. *Geoscience and exploration of the Argyle, Bunder, Diavik and Murowa diamond deposits*, 2018, vol. 20, pp. 201–222.
50. Pearson D., Giulianil A. kimberlites: from deep earth to diamond mines. *Elements*, 2019, vol. 15, pp. 377–380.

51. Avdeev A.N., Zoteyev O. V., Sosnovskaya E. L. Forecast of the development of the geomechanical situation in the transition from open to underground technology of excavation of steeply dipping deposits with rock caving systems. *Mining information and analytical bulletin*, 2021, vol. 5-2, pp. 6–15. In Rus. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_6.
52. Kiselev V.V., Khokholov Yu.A. On the issue of construction, operation and mobility of rock safety cushions during underground mining of underground diamond-bearing pipes in permafrost. *Eurasian Scientific Association*, 2019, no. 11-2 (57), pp. 1–4. In Rus.
53. Polovov B.D., Volkov D.V. Geotechnical monitoring of mining structures in the system of evaluation and quality assurance of geomechanical solutions. *News of the Ural State Mining University*, 2020, vol. 2, no. 58, pp. 139–160. In Rus. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-2-139-160.
54. Pu Y., Apel D.B., Xu H. Rockburst prediction in kimberlite with unsupervised learning method and support vector classifier. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, vol. 90, pp. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.04.019>
55. Zubov V.P., Anisimov K.A. Substantiation of the method ensuring the safe development of the pit reserves of kimberlite ore deposits in the conditions of the Udachny mine. *E3S Web of Conferences*, 2021, pp. 101–112.
56. Cherepovitsyn A., Solovyova V. Prospects for the development of the Russian rare-earth metal industry in view of the global energy transition. *A Review. Energies*, 2022, vol. 15, pp. 387–342. DOI: 10.3390/en15010387
57. Balek A., Sashourin A. In-situ rock mass stress-state measurements in scales of mineral deposits: problem-solving. *E3S Web of Conferences*, 2018, 56:02004. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185602004> (accessed 5 August 2022).
58. Hoek E., Brown E.T. The Hoek–Brown failure criterion and GSI. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, vol. 11-3, pp. 445–463. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.001
59. Kurilko A.S., Khokholov Yu.A., Drozdov A.V., Solovyov D.E. Geothermal control of soils at the base of headframes and the mouth part of vertical shafts on the example of the Udachny diamond mine (Yakutia). *Earth's cryosphere*, 2017, vol. 21, pp. 82–91. In Rus.
60. Tovey M., Giuliani A., Phillips D., Moss S. Controls on the explosive emplacement of diamondiferous kimberlites: New insights from hypabyssal and pyroclastic units in the Diavik mine, Canada. *Lithos*, 2020, vol. 360, pp. 105–110.
61. Zharikov S.N., Shemenov V.G., Zyryanov I.V., Bondarenko I.F., Khon V.I. On the development of standards for the design of drilling and blasting operations in the conditions of diamond quarries located in the permafrost zone. *Rational development of subsoil*, 2017, vol. 1, pp. 56–60. In Rus.

Received: 14 September 2022.

Reviewed: 22 September 2022.

Information about the authors

Kirill A. Anisimov, post-graduate student, St. Petersburg Mining University.

Aleksandr V. Nikiforov, cand. Sc., associate professor, St. Petersburg Mining University.

УДК 553.4

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУДОВМЕЩАЮЩЕЙ ТОЛЩИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ УГАХАН, БОДАЙБИНСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН

Шепель Елена Вячеславовна¹,
liena-safina@mail.ru

Аюпова Нурия Радитовна^{1,2},
ayupova@mineralogy.ru

¹ Институт минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН, Россия, 456317, г. Миасс, тер. Ильменский заповедник.

² Филиал Южно-Уральского государственного университета в г. Миассе, Россия, 456318, г. Миасс, пр. Октября, 16.

Актуальность исследования обусловлена возрастающим интересом к запоторудным месторождениям, находящимся в Бодайбинском рудном районе. Изучение этого района отражено в многочисленных публикациях, несмотря на это, отсутствует единое представление о происхождении месторождений золота в черносланцевых толщах. В связи с тем, что месторождение Угахан является единственным запоторудным объектом Бодайбинского рудного района, локализованным в породах бужухтинской свиты, детальное минералого-геохимическое изучение вмещающей толщи позволяет оценить золотое оруденение с генетической точки зрения и уточнить перспективность бужухтинской свиты для поиска новых запоторудных объектов.

Цель: выяснение условий литогенеза в концентрации металлов в сульфидсодержащих метаосадочных породах бужухтинской свиты.

Объектом исследования является месторождение Угахан, расположенное в Иркутской области Бодайбинского района.

Методы. Оптико-минералогическое изучение пород выполнено с использованием микроскопа Olympus BX51, оснащенного камерой для фотографирования. Для изучения акцессорной минерализации применен сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega 3 sbi с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-act. Содержание основных оксидов в породах (9 проб) определено силикатным анализом на 12 компонентов. Содержания элементов-примесей (6 проб, на 40 элементов), в том числе и редкоземельных элементов, изучены методом ИСП-МС (масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой) на спектрометре ICP-MS Agilent 7700x (Япония). Исследования выполнены в Южно-Уральском федеральном научном центре минералогии и геоэкологии УрО РАН.

Результаты. Рудовмещающие породы на месторождении Угахан представлены переслаиванием метапесчаников, метаалевролитов и углеродистых сланцев, обломочный материал которых сложен слабоокатанными зернами кварца, полевых шпатов (альбитом и ортоклазом) и фрагментами микрофоссилий в основной слюдисто-хлорит-карбонатной массе. Из акцессорных минералов установлены зерна турмалина, циркона, рутила, апатита, титанита, многочисленные минералы редкоземельных элементов – монацит, ксенотим, РЗЭ-содержащий эпидот, бастнезит, анкилит, РЗЭ-содержащие торит, уранинит и коффинит. Последовательность минералообразования свидетельствует о перераспределении первично накопленного вещества и его концентрировании с образованием минеральных форм РЗЭ, Th и U на всех этапах литогенеза и метаморфогенно-идротермальной стадии преобразования первичных углеродсодержащих осадков. Сравнительный анализ химического состава метаосадков показывает, что в ряду метапесчаники → метаалевролиты → углеродистые сланцы уменьшение содержания SiO₂ сопровождается повышением содержания Al₂O₃, MgO, TiO₂, FeO*, K₂O и P₂O₅. В этом же ряду наблюдается возрастание содержания Sc, V, Cr, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Th, U и редкоземельных элементов. Отличительной чертой метаосадков бужухтинской свиты являются высокие содержания V, Co, Ni, Th, U, Mo, Ba, Sr и редкоземельных элементов, что вызвано участием органического вещества в диагенетических процессах. Рассчитанные петрохимические модули и их корреляционные зависимости свидетельствуют о единой природе осадочного материала и возможном влиянии на формирование осадков вулканогенного материала.

Ключевые слова:

Метаосадочные породы, минеральные ассоциации, элементы-примеси, запоторудное месторождение, Бодайбинский рудный район.

Введение

В пределах Байкало-Патомской (Ленской) металлогенической провинции восточной Сибири располагается Бодайбинский золотоносный рудный район, сложенный комплексами, сформировавшимися в рифее – позднем палеозое в условиях последовательной смены палеотектонических режимов от окраинно-континентального осадконакопления (ранний рифей – венд) до коллизионных процессов (кембрий – ранний карбон) [1–3]. В геологическом отношении он охватывает северо-восточную, наименее метаморфизованную, часть Мамско-Бодайбинского мегасинклинария, представленную

верхнепротерозойскими углеродсодержащими карбонатно-терригенными отложениями, смятыми в линейные складки и прорванными позднепалеозойскими гранитоидами [1, 4]. В районе зафиксированы три рудных узла: Хомолхинский (месторождения Угахан, Голец Высочайший), Маракано-Тунгусский (месторождения Ожерелье, Невское, Сухой Лог, Первальное, Вернинское) и Южно-Бодайбинский (месторождения Красное, Кавказ, Копыловское, Догалдынская Жила) и два потенциальных запоторудных узла: Анангро-Ауникитский и Кулибриянский с невыявленными к настоящему времени месторождениями золота [4, 5] (рис. 1).

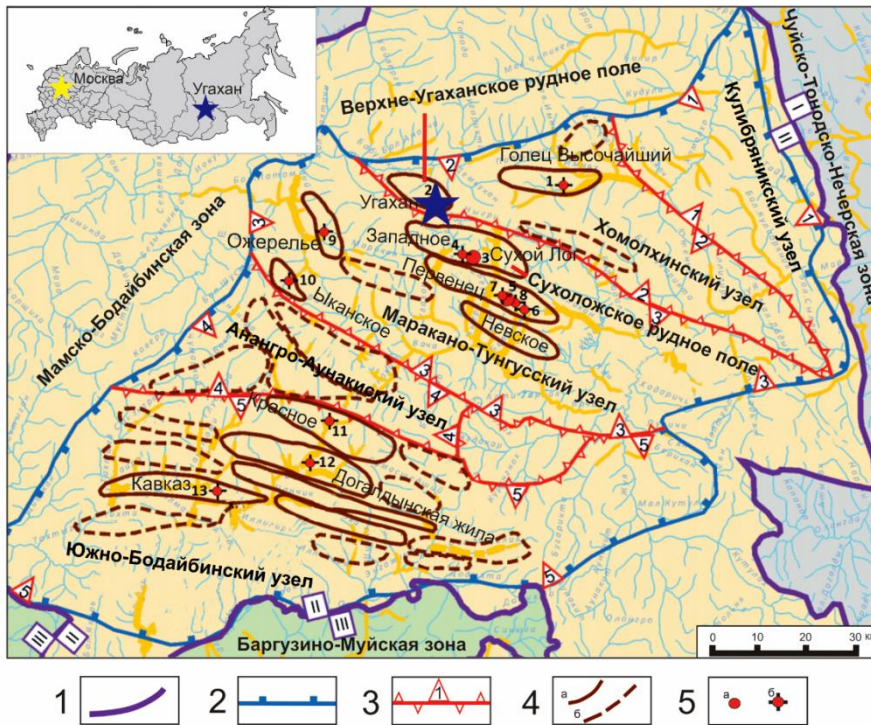


Рис. 1. Схема металлогенического районирования Бодайбинского рудного района на рудное золото [5]: 1 – границы структурно-металлогенических зон; 2 – граница Бодайбинского рудного района; 3 – границы рудных узлов; 4 – границы рудных полей (а – рудных полей, б – потенциальных рудных полей); 5 – месторождения золота (а – крупные, б – средние и мелкие)

Fig. 1. Scheme of metallogenetic zones of the Bodaibo gold-ore region [5]: Boundaries of: 1 – structural-metallogenetic zones; 2 – Bodaibo ore region; 3 – ore nodes; 4 – ore fields (a – ore fields, б – potential ore fields); 5 – gold deposits (a – large, б – medium and small)

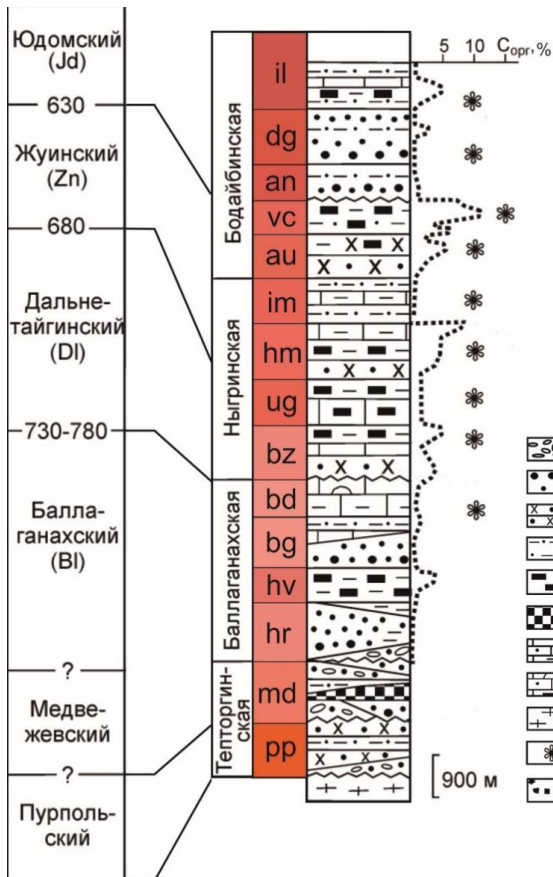


Рис. 2. Стратиграфическая колонка докембрийских отложений Бодайбинского рудного района [2]. Обозначения свит: au – аунakitская; bd – бодайбоканская; bg – бугариктинская; bz – бужуихтинская; dg – догалдынская; hm – хомолхинская; hv – хайвергинская; im – имняхская; md – медвежевская; pp – пурпольская; ug – угаханская; vc – вачская. 1 – конгломераты; 2 – гравелиты, песчаники полимиктовые, аркозовые; 3 – песчаники кварцевые, полевошпатово-кварцевые; 4 – алевролитовые отложения; 5 – углеродсодержащие отложения; 6 – вулканические породы основного состава; 7 – известняки, известняки песчаные; 8 – известняки фитолитовые (строматолитовые и микрофитолитовые), известняки песчаные; 9 – граниты, гнейсы, кристаллические сланцы нижнего докембрия; 10 – местонахождения микрофоссилий; 11 – содержание $C_{орг}$

Fig. 2. Stratigraphic column of Precambrian sedimentary rocks of the Bodaibo gold-ore region [2]. Suites: au – Aunakit; bd – Bodaibokan; bg – Bugarikhta; bz – Buzhuikhtha; dg – Dogaldyn; hm – Khomolkho; hv – Khaiverga; im – Imnyakh; md – Medvezhevsk; pp – Purpol; ug – Ugakhan; vc – Vacha. 1 – conglomerates; 2 – gravelites, polymictic sandstones, arkose; 3 – quartz and feldspar-quartz sandstones; 4 – siltstones; 5 – carbonaceous sediments; 6 – volcanic rocks of the basic composition; 7 – limestones, sandy limestones; 8 – phytolithic limestones (stromatolite and microphytolite), sandy limestones; 9 – granites, gneisses, crystalline shales of the Lower Precambrian; 10 – locations of microfossils; 11 – C_{org} contents

Данные рудные узлы относятся по геологическим особенностям и слагающим их углеродсодержащим литолого-фациальным толщам с золоторудной минерализацией к различным стратиграфическим уровням, представленным отложениями баллангахской, ныгринской и бодайбинской серий эдиакарского периода (~540 – ~770 млн лет) неопротерозоя [4, 6–12] (рис. 2). Характерной чертой района является зональное изменение степени метаморфизма рудовмещающих пород от низов амфиболитовой фации в краевой части района до серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации в центральной [7]. В зависимости от степени метаморфизма меняется минеральный состав, морфологические особенности и типоморфные свойства минералов, состав элементов-примесей рудовмещающей толщи.

В данной работе приведена характеристика минералого-геохимических особенностей рудовмещающей толщи месторождения Угахан Хомолхинского рудного узла, единственного золоторудного объекта в отложениях бужуихтинской свиты ($R_{2+3}bz$) (рис. 2). Изучение минералогии и литогеохимических особенностей метаосадочных пород месторождения может дополнить сведения об источниках вещества, минералого-геохимических ассоциациях, чувствительных к процессам преобразования исходных терригенных пород. Полученные результаты исследований могут быть полезными в оценке перспективности бужуихтинской свиты для поиска новых золоторудных объектов.

Геологическая характеристика месторождения

Месторождение Угахан расположено в 150 км от г. Бодайбо в северной части Бодайбинского рудного района в пределах Хомолхинского рудного узла (рис. 1). Оруденение приурочено к висячему крылу запрокинутой к югу Верхне-Угаханской антиклинальной структуры, которая сложена отложениями бужуихтинской свиты [6, 13] (рис. 3).

Бужуихтинская свита сложена переслаивающимися углеродистыми сланцами, метаалевролитами и метапесчаниками, в которых имеются зоны сульфидной вкрапленной и кварц-сульфидной прожилково-вкрапленной минерализации. Выше по разрезу, на отложениях бужуихтинской свиты, согласно залегают карбонатизированные метапесчаники угаханской свиты, слагающие крылья одноименной антиклинали. Породы бужуихтинской свиты подвержены региональному метаморфизму серицит-хлоритовой субфации фации зеленых сланцев [13].

На месторождении оконтурены пять рудных залежей с содержанием 0,2 г/т Au, которые расположены в нижних горизонтах верхне-бужуихтинской подсвиты в виде кварцево-жильной и прожилково-

вкрапленной сульфидной минерализации [13]. Руды сульфидами насыщены слабо (мало- и убогосульфидные). Среднее суммарное содержание сульфидов на рудную зону составляет 1032 г/т, что составляет чуть больше 0,1 % объема породы [13]. По данным пробирного анализа содержание золота в интервале минерализованной зоны (мощность 50 м, 49 бороздовых проб) колеблется от 0,01 до 9,16 г/т при среднем содержании 1,08 г/т, а содержания $Ag < 1,00$ г/т [13].

Материалы и методы исследования

Для минералого-геохимических исследований были отобраны штучные образцы метапесчаников, метаалевролитов и углеродистых сланцев, содержащие сульфидную минерализацию, кварцевые и карбонатные прожилки в карьере месторождения Угахан. Петрографическое изучение метаосадков выполнено с использованием микроскопа Olympus BX51, оснащенного камерой для фотографирования. Для изучения акцессорной минерализации применен сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega 3 sbu с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-act (диаметр электронного пучка 1 микрон, ток пучка 15 нА, ускоряющее напряжение 20 кВ, время счета 120 с для пиков, время задержки 10–15 % для пиков). Количественный анализ химического состава минералов проведен с использованием эталонов зарегистрированного стандарта № 1362 (Microanalysis Consultants Ltd), а также были использованы MINM25-53 (Astimes Scientific Limited, серийный номер 01-044) и НЭРМА.ГЕО1.25.10.7417 (аналитик М.А. Рассомахин). Использованная модификация оборудования содержания CO_2 и ОН групп не определяет.

Пробы для анализов были подготовлены из образцов, представляющих собой однородные слои метапесчаников, метаалевролитов и углеродистых сланцев, которые были отобраны на различных уровнях в карьере месторождения. Содержание основных оксидов в породах (9 проб) определено силикатным анализом на 12 компонентов. Содержания элементов-примесей (6 проб, на 40 элементов), в том числе и редкоземельных элементов (РЗЭ), изучены методом ИСП-МС (масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой) на спектрометре ICP-MS Agilent 7700x (Япония) путем разложения образцов растертой породы с помощью кислотного разложения на плитке (аналитик К.А. Филиппова). Для анализа использовались навески образцов массой 0,1 г. Интерпретация состава пород месторождения Угахан проводилась по стандартным петрохимическим параметрам (модулям), рассчитываемым по силикатным анализам [14]. Полученные результаты анализов сопоставлены с данными из литературных источников [15, 16].

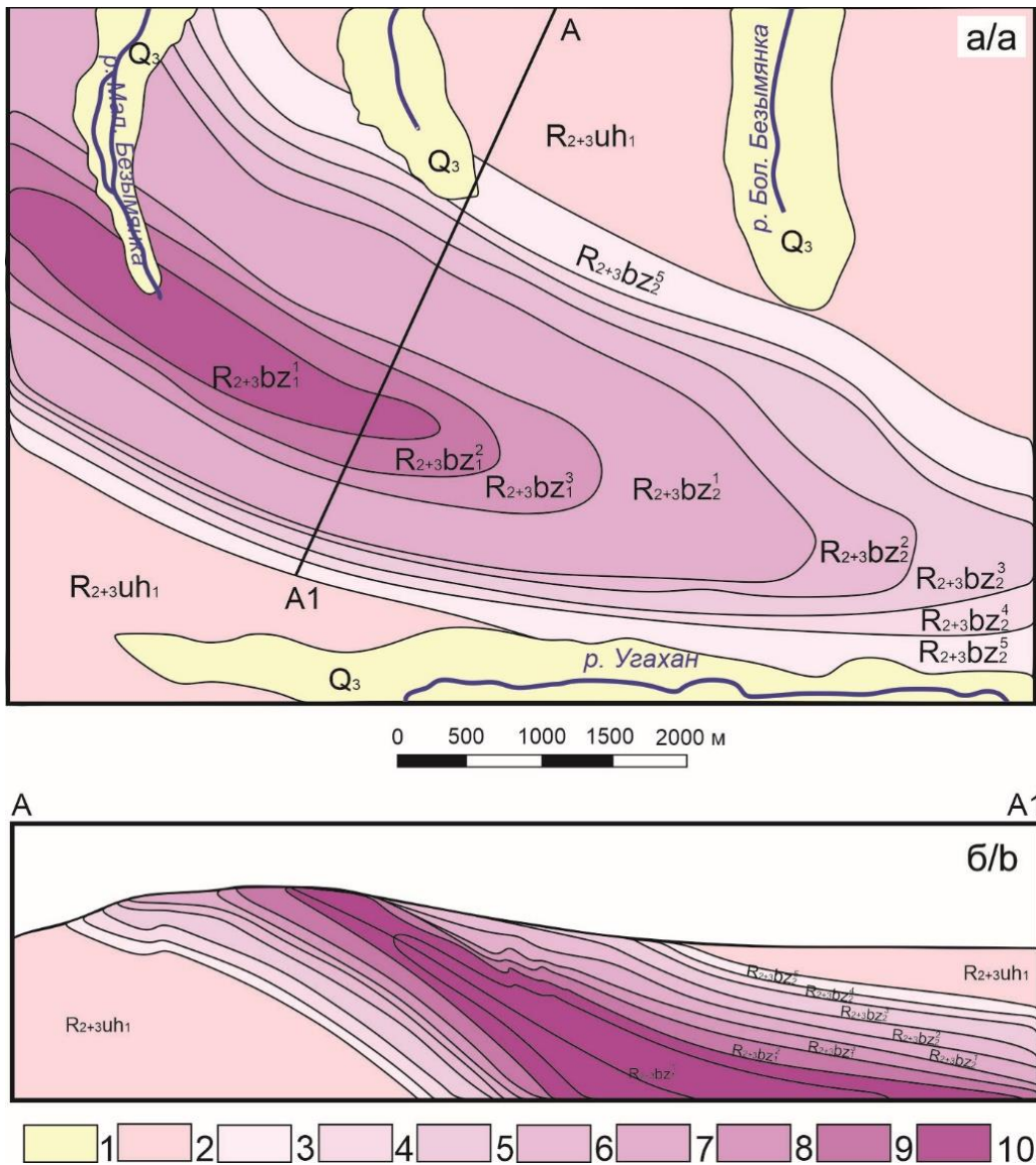


Рис. 3. Схематическая геологическая карта (а) и геологический разрез (б) месторождения Угахан с упрощениями [6, 13]: 1 – верхнечетвертичные отложения (Q_3); Угаханская свита: 2 – нижняя подсвита ($R_{2+3}uh_1$): переслаивание углеродистых слюдиисто-кварцевых алевролитов и известняков; Бужуихтинская свита: 3–7 – верхняя подсвита: 3 – пятая пачка ($R_{2+3}bz_2^5$): песчаники полевошпатово-кварцевые, кварцевые, известковистые с прослоями углеродистых сланцев; 4 – четвертая пачка ($R_{2+3}bz_2^4$): сланцы углеродистые слюдиисто-кварцевые с редкими прослоями песчаников полевошпатово-кварцевых; 5 – третья пачка ($R_{2+3}bz_2^3$): песчаники полевошпатово-кварцевые известковистые с прослоями алевролитов и сланцев; 6 – вторая пачка ($R_{2+3}bz_2^2$): переслаивание песчаников, алевролитов и слюдиисто-кварцевых углеродистых сланцев; 7 – первая пачка ($R_{2+3}bz_1^1$): переслаивание песчаников полевошпатово-кварцевых, сланцев и алевролитов углеродистых; 8–10 – нижняя подсвита: 8 – третья пачка ($R_{2+3}bz_1^3$): ритмичное переслаивание алевролитов и сланцев и песчаников; 9 – вторая пачка ($R_{2+3}bz_1^2$): песчаники кварцевые, полевошпатово-кварцевые с прослоями сланцев углеродистых и алевролитов; 10 – первая пачка ($R_{2+3}bz_1^1$): сланцы углеродистые слюдиисто-кварцевые, прослои алевролитов и песчаников кварцевых

Fig. 3. Geological map (a) and cross section (b) of the Ugakhan gold deposit with simplifications [6, 13]: 1 – upper quaternary sediments (Q_3); Ugakhan formation: 2 – lower sub-formation: interlayer of carbonaceous mica-quartz siltstones and limestones; Buzhuikhta formation: 3–7 – upper sub-formation: 3 – fifth pack ($R_{2+3}bz_2^5$): feldspar-quartz, quartz, calcareous sandstones with interlayers of black shales, 4 – fourth pack ($R_{2+3}bz_2^4$): calcareous feldspar-quartz and quartz sandstones with interlayers of black shales, 5 – third pack ($R_{2+3}bz_2^3$): calcareous feldspar-quartz sandstones with layers of siltstones and black shales, 6 – the second pack ($R_{2+3}bz_2^2$): layering of sandstones, siltstones and mica-quartz shales, 7 – the first pack ($R_{2+3}bz_1^1$): layering of feldspar-quartz sandstones, black shales and siltstones; 8–10 – lower sub-formation: 8 – the third pack ($R_{2+3}bz_1^3$): rhythmic layering of siltstones, shales and sandstones, 9 – the second pack ($R_{2+3}bz_1^2$): quartz and feldspar-quartz sandstones with interlayers of black shales and siltstones; 10 – the first pack ($R_{2+3}bz_1^1$): mica-quartz shales with interlayers of siltstones and quartz sandstones

Результаты исследования

Минеральный состав метасадков

Метасадочные породы (метапесчаники, металевролиты и углеродистые сланцы) характеризуются текстурами от сланцеватой до линзовидно-очковой и лепидогранобластовой, лепидобластовой, гранобластовой структурами (рис. 4, а, б). Количество обломочного материала в метапесчаниках и металевролитах варьирует от 20 до 65 об. % и уменьшается в углеродистых сланцах до 2–3 об. %. Обломочный материал в основном представлен слабоокатанными зернами кварца и полевыми шпатами (альбитом и ортоклазом), а основная масса – слюдястым материалом (мусковитом и серицитом), хлоритом и карбонатами в разных соотношениях (рис. 4, в). Фрагменты микрофоссилий округлой, овальной и сложной формы (диаметр до 1,5 мм), иногда с хорошо выраженной концентрической зональностью, проявленной в чередовании темных (углеродистое вещество) и светлых (карбонатно-слюдястый материал) слоев, являются характерным признаком всех изученных типов пород (рис. 4, з). По результатам термического анализа содержание органического вещества в пробах составляет 1–3 мас. % [17].

Из аксессуарных минералов установлены зерна турмалина, циркона, рутила, апатита и титанита. Для циркона и турмалина отмечается тонкая новообразованная кайма мощностью от 1–3 до 10 мкм. Апатит обычно замещается минералами РЗЭ (монацитом, ксенотимом и анкилитом). Титанит встречается в межобломочном пространстве.

Редкоземельная минерализация в изученных породах представлена РЗЭ-содержащим эпидотом, бастнезитом, анкилитом, РЗЭ-содержащим торитом, монацитом и ксенотимом. Подробное описание редкоземельных минералов приведено в работе [17]. Количество и разнообразие минералов РЗЭ возрастает от метапесчаников к углеродистым сланцам. Основным концентратором РЗЭ является РЗЭ-содержащий эпидот (Σ РЗЭ 12,17–24,01 мас. %), который обнаружен в виде обломков (рис. 4, а) и кристаллов, частично замещенных более поздними карбонатами РЗЭ – бастнезитом и анкилитом (рис. 4, д, е). Повсеместно в каймах вокруг кристаллов РЗЭ-эпидота в ассоциации с бастнезитом наблюдаются многочисленные включения торита размером 10–15 мкм (рис. 4, д). В составе торита содержание РЗЭ варьирует от 18,9 до 25,01 мас. %. Более поздние тонкие прожилки (мощность до 10 мкм) анкилита обнаружены в пирите. Наблюдается замещение монацитом, ксенотимом и анкилитом апатита. Апатит также встречается в тесном сростании с ксенотимом (рис. 4, ж). В ассоциации с минералами РЗЭ установлены минералы урана – уранинит и коффинит – в виде редких самостоятельных образований размером до 30 мкм в основной массе. Для уранинита характерно образование коллоидно-почковидных выделений в ассоциации с органическим веществом (рис. 4, з). Наблюдается замещение уранинита анкилитом. Коффинит обычно образует оторочку вокруг уранинита.

В изученных породах наблюдается сульфидная минерализация от единичных вкрапленных зерен пирита до образования сульфидных прожилков мощностью до 1 см при содержании сульфидов в породах до 2 %. Преобладающими сульфидными минералами являются пирротин и пирит, редко встречаются халькопирит, сфалерит, галенит, арсенопирит и молибденит. Породы местами пронизаны сетью тонких кварцевых прожилков и жилами кварца мощностью до 5 см. Самородное золото округлой, изометричной, удлиненной и таблитчатой формы обычно расположено в промежутках между нерудными минералами, встречается в сростках с хлоритом, мусковитом, кварцем, редко с сульфидами.

Геохимия метасадков

Основные породообразующие компоненты. В химическом составе метасадочных пород месторождения Угахан проявляется общая закономерность в вариациях породообразующих оксидов (рис. 5, а). Метапесчаники характеризуются повышенными содержаниями (мас. %) SiO_2 (66,92–76,00) и пониженными Al_2O_3 (11,67–13,32). По сравнению с метапесчаниками в углеродистых сланцах содержания SiO_2 снижаются (мас. %) (51,40–57,26), а содержания Al_2O_3 (20,56–22,17) и TiO_2 (1,01–1,10) увеличиваются. В металевролитах отмечаются их промежуточные значения (табл. 1). Содержания MgO (мас. %) в изученных породах варьируют. В углеродистых сланцах и металевролитах определены повышенные содержания $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$, K_2O и P_2O_5 по сравнению с метапесчаниками (табл. 1). Наблюдаются варьирующие содержания CaO в метапесчаниках (мас. %) (до 4,26), тогда как для углеродистых сланцев они достаточно низкие (0,28–0,48). Преобладание Na_2O над K_2O характерно для метапесчаников, а обратные соотношения – для углеродистых сланцев (рис. 5, а). Низкие содержания MnO – типичная черта всех типов изученных пород. Среднее значение содержаний основных породообразующих компонентов в изученных породах сопоставимо с опубликованными данными [15, 16] (табл. 1). Некоторые колебания в содержаниях FeO^* и CaO отражает слоистый характер пород и незначительные различия в степени их сульфидизации ($S_{\text{сульф}}$ до 3,97 мас. %) и карбонатизации (CO_2 до 3,75 мас. %).

Элементы-примеси. Распределение элементов-примесей в метасадочных породах представлено в табл. 2. Наблюдается более чем двукратное увеличение содержаний Sc, V, Cr, Ga, Rb, Ba, Zr, Th, U в ряду: метапесчаники → металевролиты → углеродистые сланцы (табл. 2, рис. 5, б). Повышенные содержания (г/т) Cu (63,4–130), Ni (77,6–171), Co (19,9–51,4) характерны для металевролитов и углеродистых сланцев. В углеродистых сланцах выявлены наиболее высокие содержания Zn (125–190 г/т). Повышенные содержания W (до 20,4 г/т) обнаружены в метапесчаниках и металевролитах (рис. 5, б). Крайне низкие содержания Be, Se, Mo (менее 3 г/т) и Cd, Te, Tl (менее 0,50 г/т), аномально высокие содержания Ba (879–3006 г/т) и Sr (118–387 г/т), равномерное распределение содержаний As (20,0–57,5 г/т) – характерная чер-

та всех разновидностей изученных пород. Повышенные содержания халькофильных элементов (Cu, Co, Ni, As, Mo, W) в изученных породах по сравнению с

данными по [15, 16] обусловлены присутствием значительного количества сульфидной минерализации в метаалевролитах и углеродистых сланцах.

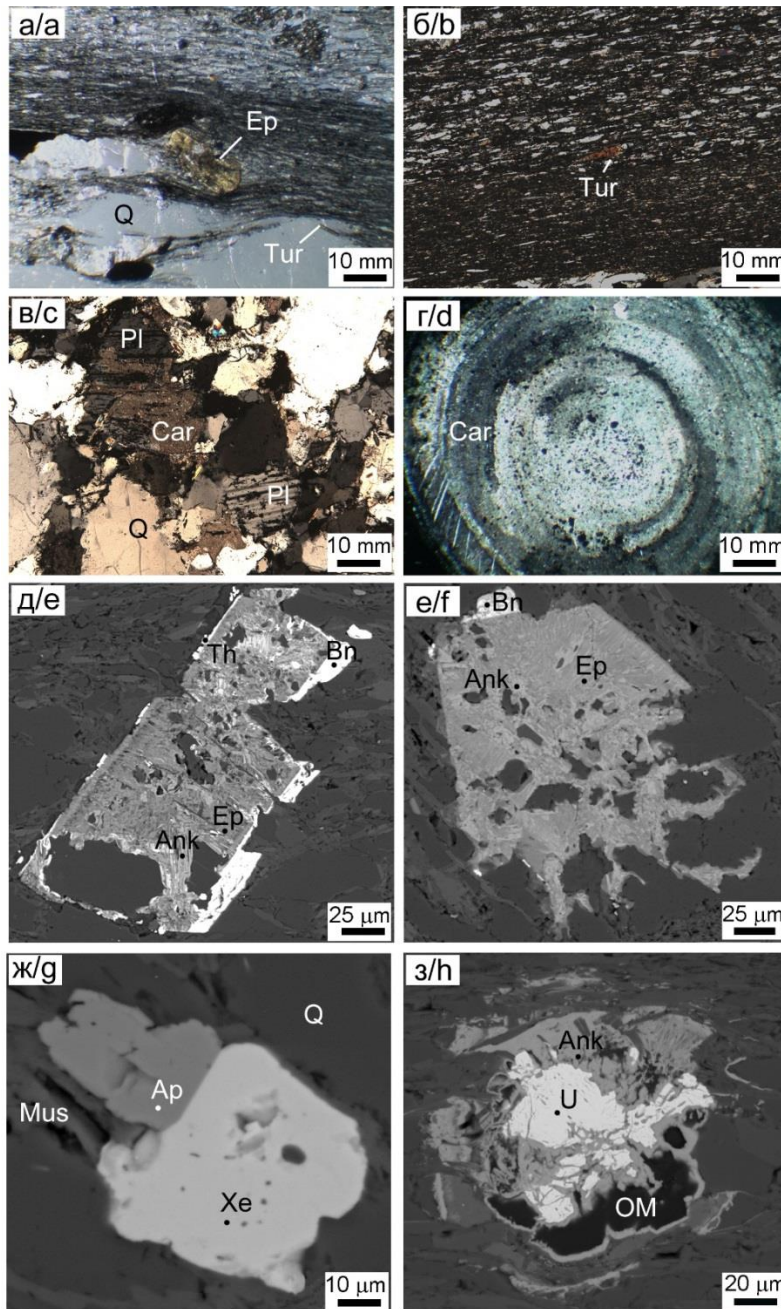


Рис. 4. Минеральный состав метасадочных пород бужуйкхтинской свиты месторождения Угахан: а) РЗЭ-содержащий эпидот (Ep) на контакте слоев углеродистых сланцев и метапесчаников; б) зерна турмалина (Tur) в слоях метаалевролитов и углеродистых сланцев; в) развитие карбоната (Car) по таблитчатым зернам плагиоклаза (Pl); г) концентрически-зональное строение микрофоссилии; д) кайма из бастнезита (Bn) с включениями РЗЭ-содержащего торита (Th) вокруг РЗЭ-содержащего эпидота (Ep); е) развитие анкилита (Ank) по РЗЭ-содержащему эпидоту; ж) тесное срастание ксенотима (Xe) с апатитом (Ap); з) органическое вещество (OM) в ассоциации с уранинитом (U) и анкилитом. Q – кварц, Mus – мусковит. Фотографии а) в поляризованном свете; б–г) с анализатором; д–з) BSE фото

Fig. 4. Minerals in metasedimentary rocks from the Buzhuikhta formation of the Ugakhan deposit: a) REE-bearing epidote (Ep) at the contact between layers of carbonaceous shales and metasandstones; b) tourmaline (Tur) grains in meta-siltstone and carbonaceous shale layers; c) replacement of tabular plagioclase (Pl) by carbonate (Car); d) clearly concentric-zoned texture of microfossil; e) tabular grain of REE-epidote (Ep) with a bastnesite (Bn) rim containing thorite inclusions (Th); f) replacement of REE-epidote (Ep) by ankylite (Ank); g) intergrowths of xenotime (Xe) and apatite (Ap); h) organic matter (OM) in association with uraninite (U) and ankylite. Q – quartz, Mus – muscovite. Photos: a) polarized light; b–d) with analyzer; e–h) BSE photo

Таблица 1. Химический состав метасадков бужуйхтинской свиты на месторождении Угахан (мас. %)

Table 1. Chemical composition of metasedimentary rocks of Buzhuikhta formation in the Ugakhan deposit (wt. %)

Компоненты Components	Метаспесчаники Metasandstones			Метаалевролиты Metasiltstones			Углеродистые сланцы Black shales			Среднее/Average		
	n=9	по [15], n=31	по [16], n=26	n=9	по [15], n=31	по [16], n=26	n=9	по [15], n=31	по [16], n=26	n=9	по [15], n=31	по [16], n=26
SiO ₂	69,14	76,00	66,92	64,40	59,60	61,24	51,40	57,26	55,34	62,37	55,67	55,7
TiO ₂	0,62	0,41	0,63	0,60	0,51	0,87	1,08	1,10	1,01	0,76	0,76	0,56
Al ₂ O ₃	12,19	11,67	13,32	12,26	16,70	11,66	22,17	20,56	20,97	15,72	13,91	13,91
FeO*	2,86	2,74	6,52	11,93	3,55	8,39	9,39	9,08	10,49	7,22	3,56	4,67
MnO	0,04	0,01	0,02	0,02	0,05	0,11	0,01	0,13	0,11	0,06	0,04	0,04
MgO	0,76	0,82	0,53	0,52	1,33	2,86	1,70	0,73	0,76	1,11	0,88	1,04
CaO	4,26	1,55	4,06	1,66	5,00	4,39	0,48	0,28	0,37	2,45	8,09	8,09
Na ₂ O	3,08	2,34	3,53	2,02	2,01	2,96	1,44	1,46	1,17	2,22	1,67	1,77
K ₂ O	1,44	1,68	1,42	1,62	2,92	0,86	5,15	4,12	3,48	2,52	2,36	2,72
P ₂ O ₅	<0,05	<0,05	<0,05	0,13	0,08	0,22	0,07	0,08	0,26	0,11	0,08	0,08
п.п.п.	3,30	2,02	2,48	4,26	3,90	5,78	6,64	4,70	5,34	4,27	–	–
CO ₂	2,00	0,32	0,45	0,96	3,75	2,76	0,13	<0,10	0,40	1,22	–	–
S _{сульф}	0,65	0,60	0,47	3,21	0,15	2,37	3,97	2,45	3,10	1,89	–	1,57
Сумма	99,74	99,61	99,93	100,38	99,55	99,54	99,66	99,60	99,70	–	–	–

Примечание. FeO* – FeO+Fe₂O₃; п.п.п. – потери веса пробы при ее прокаливании; «–» – нет данных; n – количество анализов

Note: FeO* – FeO+Fe₂O₃; p.p.p. – weight loss of the sample when it is calcined; «–» – no data; n – number of analyzes.

Таблица 2. Содержания элементов-примесей в метасадочных породах бужуйхтинской свиты Угаханского месторождения (г/т)

Table 2. Contents of trace elements in the metasedimentary rocks of the Buzhuikhta formation of the Ugakhan deposit (g/t)

Элементы-примеси Impurity elements	Метаспесчаники Metasandstones		Метаалевролиты Metasiltstones		Углеродистые сланцы Black shales		Среднее/Average		
	n=6	по [15], n=32	по [16], n=26	n=6	по [15], n=32	по [16], n=26	n=6	по [15], n=32	по [16], n=26
Li	16,3	18,6	16,3	54,1	42,5	53,7	33,58	–	–
Be	0,80	0,89	0,85	1,41	2,46	1,53	1,32	–	–
Sc	7,78	7,44	8,13	15,06	21,3	21,02	13,46	–	–
V	61,8	51,8	86,6	106	177	168	108	206	166
Cr	50,9	52,6	50,9	78,7	152	148	88,85	98,32	93,44
Co	6,56	4,54	51,4	19,9	38,5	20,2	23,52	8,01	8,01
Ni	20,7	16,6	171	124	102	77,6	85,32	38,44	38,4
Cu	16,6	15,8	130	79,8	88,5	63,4	65,68	36,57	36,57
Zn	39,8	30,3	46,2	36,1	190	125	77,9	74,46	74,61
Cd	0,24	0,15	0,29	0,12	0,31	0,22	0,22	–	–
Ga	12,3	13,8	12,3	16,4	32,5	21,1	18,07	–	–
As	26,3	57,5	20,0	29,4	41,7	32,9	34,63	–	5,20
Rb	59,8	69,7	66,8	80,6	180	152	101	–	93,8
Sr	387	118	229	145	167	130	196	–	840
Y	9,47	3,76	7,45	7,11	15,2	5,63	8,1	–	–
Zr	122	72,9	81,4	107	134	167	114	172	–
Mo	2,25	2,62	1,60	1,13	2,87	0,97	1,91	8,72	8,72
Ba	943	1016	879	546	3006	693	1180	1361	1360
W	9,89	20,4	20,3	16,3	4,15	2,36	12,23	1,81	–
Pb	7,24	3,34	16,4	10,3	7,97	15,8	10,18	13,95	–
Th	8,33	4,11	6,55	5,04	12,1	5,70	6,97	8,65	–
U	1,65	0,95	1,16	1,00	2,26	0,99	1,34	3,12	3,61
La	18,4	10,4	37,3	30,1	46,8	39,1	30,35	–	–
Ce	36,3	21,5	72,3	63,7	93,7	86,3	62,3	–	–
Pr	4,04	2,3	8,11	6,52	10,6	9,2	6,8	–	–
Nd	14,7	8,51	30,1	35,8	40,2	37,4	27,79	–	–
Sm	2,68	1,53	5,47	6,51	7,57	6,87	5,11	–	–
Eu	0,88	0,67	1,25	1,09	2,01	1,99	1,32	–	–
Gd	2,42	1,38	4,16	3,93	5,35	4,65	3,65	–	–
Tb	0,34	0,16	0,46	0,41	0,66	0,61	0,44	–	–
Dy	1,82	0,85	1,85	1,73	3,14	2,89	2,05	–	–
Y	9,47	3,76	7,45	8,65	15,2	10	9,09	–	–
Ho	0,37	0,15	0,29	0,42	0,56	0,65	0,41	–	–
Er	1,13	0,71	0,81	1,30	1,63	1,56	1,19	–	–
Tm	0,16	0,06	0,11	0,22	0,25	0,31	0,19	–	–
Yb	1,11	0,45	0,76	1,49	1,6	1,86	1,21	–	–
Lu	0,18	0,07	0,14	0,23	0,5	0,2	0,22	–	–
сумма РЗЭ	94	52	170	162	229	203	151,67	–	–
V/Cr	1,21	0,99	1,70	1,34	1,16	1,14	1,26	–	–
V/(V+Ni)	0,75	0,75	0,33	0,46	0,63	0,68	0,6	–	–
Eu/Eu*	1,52	2,02	1,15	0,95	1,39	1,55	1,43	–	–
Ce/Ce*	0,49	0,39	0,69	0,63	0,78	0,77	0,63	–	–

Примечание/Note. Содержания/Contents Se<0,50, Te<0,30, Tl<0,50, Au<0,20, Ag<1,00.

Редкоземельные элементы. Содержания РЗЭ уменьшаются в ряду: углеродистые сланцы (203–229 г/т) → метаалевролиты (162–170 г/т) → метапесчаники (52–94 г/т). Спектры распределения РЗЭ, нормированные на североамериканский сланец (NASC), для всех изученных пород характеризуются преобладанием легких лантаноидов над тяжелыми: $LREE/HREE=4,53-11,72$ (рис. 5, в). На спектре РЗЭ отчетливо проявлена положительная Eu-аномалия $Eu/Eu^*=Eu_N/(Sm_N^*/Gd_N)^{1/2}$ [18] и заметная отрицательная Ce-аномалия $Ce/Ce^*=0,39-0,78$ ($Ce/Ce^*=Ce_N/(La_N+Nd_N)^{1/2}$ [18]).

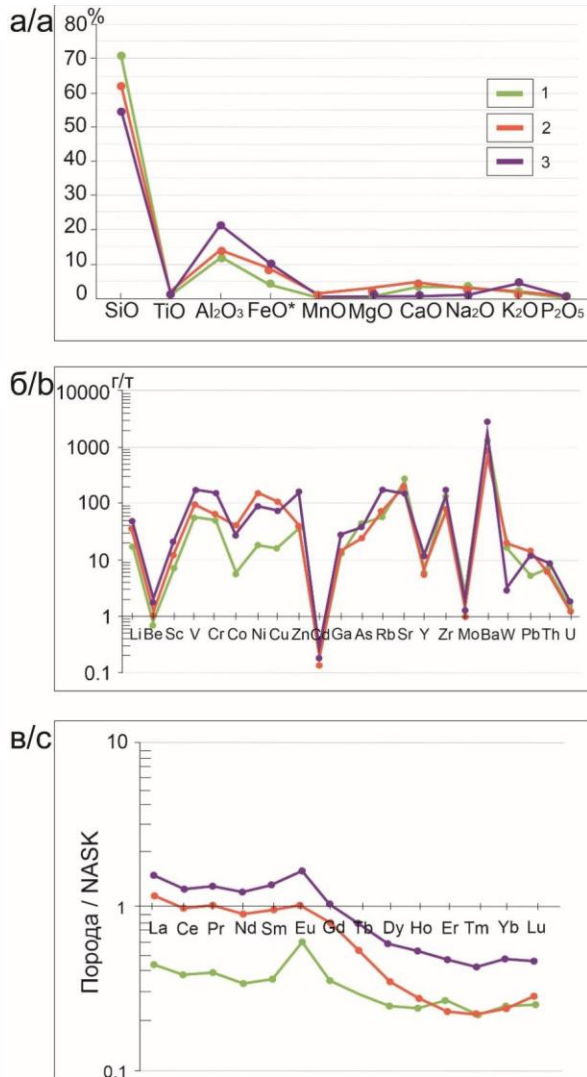


Рис. 5. Графики распределения средних содержаний основных породообразующих оксидов (а), элементов-примесей (б) и спектры распределения РЗЭ, нормированные на NASC [19] (в) в метасадочных породах месторождения Угахан: 1 – метапесчаники; 2 – метаалевролиты; 3 – углеродистые сланцы

Fig. 5. Main oxide (a) and trace element (b) contents and NASC [19] normalized REE plot (c) of metasedimentary rocks from the Buzhuikhta Formation in the Ugakhan deposit: 1 – metasandstones; 2 – metasiltstones; 3 – black shales

Обсуждение результатов исследования

Существуют две основные теории происхождения золоторудных месторождений в черносланцевых толщах Бодайбинского района: 1) постмагматическо-гидротермальная, согласно которой основной этап концентрирования золота в рудах и привнос части цветных и благородных металлов отвечает становлению постметаморфических интрузий и сопровождается метасоматическими преобразованиями пород [20–22] и 2) метаморфогенно-гидротермальная, согласно которой рудообразование связано с региональным метаморфизмом металлоносных углеродистых толщ с первичным накоплением золота в органическом веществе и осадочном и диагенетическом пирите, где значительная роль отводится к гидротермально-осадочным процессам, представленным жильно-прожилковым окварцеванием, сульфидизацией, мусковитизацией и образованием железомagneзиальных карбонатов [7, 10, 11, 23, 24]. Для метаморфогенно-гидротермальной модели рудообразования важно выявление разнообразных минеральных ассоциаций и литохимических особенностей золотоносных углеродистых пород, связанных с условиями седиментогенеза, характером и полнотой проявления последующих стадий литогенеза.

Вмещающие породы бужуихтинской свиты Угаханского месторождения золота метаморфизованы в условиях серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации метаморфизма [13], что подтверждается их текстурно-структурными особенностями, составом породообразующих минералов и присутствием акцессорной минерализации, связанной с различными стадиями эволюции первичных осадков. В пределах месторождения гидротермально-метасоматические изменения выражены появлением сульфидной минерализации, редкой железомagneзиальной карбонатизации и мусковитизации. Околорудные метасоматиты на месторождении отсутствуют.

Характерной чертой изученных метаосадочных пород, в отличие от других месторождений Бодайбинского района, является разнообразие РЗЭ-минералов (монацит, ксенотим, бастнезит, анкилит, РЗЭ-содержащий эпидот-алланит) в ассоциации с U-Th минералами (РЗЭ-содержащие торит, уранинит, коффинит) [17], количество которых возрастает от метапесчаников к углеродистым сланцам. Наличие реликтовых и новообразованных форм минералов свидетельствует о перераспределении первично накопленного вещества и его концентрировании в виде минеральных форм на всех этапах литогенеза и метаморфогенно-гидротермальной стадии преобразования первичных углеродсодержащих осадков, которая сопровождалась консолидацией пирротин-пиритовых прослоев и перераспределением золота.

Содержания основных породообразующих компонентов изученных пород бужуихтинской толщи характеризуются закономерным распределением и в целом сопоставимы с таковыми в метаосадочных породах Бодайбинского района [8, 15, 16]. Отсутствие

значимых различий в содержании породообразующих компонентов между рудной залежью и окружающими породами рудоносной толщи может свидетельствовать о незначительных метасоматических изменениях пород, связанных с рудообразованием [25]. Для интерпретации полученных химических анализов пород в работе использовались значения петрохимических модулей [14, 26, 27], вариации которых показаны на диаграммах (рис. 6).

По значениям гидролизатного модуля ($GM = TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + MnO / SiO_2$) состав метапесчаников, метаалевролитов и углеродистых сланцев месторождения Угахан варьирует от силитов до гидролизатов (табл. 3), значения которых указывают на зрелые осадочные породы, которые практически не подвергались выветриванию [14]. Эти значения постепенно увеличиваются от 0,20–0,31 для метапесчаников, до 0,34–0,39 для метаалевролитов и 0,54–0,69 для углеродистых сланцев (рис. 6, а). Подобные содержания продуктов гидролиза в осадках указывают на большее количество в них терригенного материала и близость источника продуктов вулканической деятельности [14, 26].

Значения алюмокремниевое модуля ($AM = Al_2O_3 / SiO_2$) подтвердили интерпретацию значений GM: метапесчаники и метаалевролиты попадают в область песчаных пород ($AM = 0,15–0,28$), а углеродистые сланцы – в поле глинистых пород ($AM = 0,36–0,43$) [14]. Значимая положительная корреляция между AM и GM ($r = 0,94$) (табл. 3) может свидетельствовать о единой природе осадочного материала для всех указанных пород (рис. 6, а), что также характерно для метаосадков из других месторождений Бодайбинского района (например, [28]).

Показатели фемического модуля ($FM = Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO / SiO_2$) от 0,05 до 0,22

(табл. 3, рис. 6, б) могут указывать на возможное влияние вулканического материала при их формировании [27, 29], что согласуется с данными [3] о присутствии вулканического материала среднего состава в метаосадках Бодайбинского рудного района.

Следует отметить, что между значениями GM–ФМ ($r = 0,710$) и GM–AM ($r = 0,893$), в которых параметры нормированы по SiO_2 , наблюдаются высокие позитивные корреляции (табл. 4). Однако эти данные не являются информативными в плане генетической интерпретации, так как обусловлены формой модулей (распределение первого параметра полностью симбатно с распределением второго).

Показатели титанового модуля $TM = TiO_2 / Al_2O_3$ (0,04–0,07) (табл. 3, рис. 6, в) указывают на то, что накопление исходных осадков происходило в условиях гумидного климата в прибрежных мелководных бассейнах [27].

Модуль нормированной щелочности ($NKM = (Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$) представляет информацию о соотношении двух главных типов щелочных алюмосиликатов в составе пород: пониженные значения свидетельствуют о преобладании слюд, а повышенные – о преобладании полевых шпатов [27]. Значения НКМ для метаосадков месторождения близки к значению мусковитовой нормы 0,22–0,30, что подтверждается преобладанием мусковита в их минеральном составе. Однако негативная корреляция между значениями НКМ–GM ($r = -0,80$) и НКМ–AM ($r = -0,74$) (табл. 4, рис. 6, г) и значения $NM = Na_2O / Al_2O_3$ (0,12–0,27) и $KM = K_2O / Al_2O_3$ (0,07–0,17) в песчаниках и алевролитах (рис. 6, д, е) отвечает, что по минеральному составу эти породы относятся к менее гидрослюдистым породам с примесью полевых шпатов [27].

Таблица 3. Петрохимические модули метаосадочных пород месторождения Угахан

Table 3. Petrochemical modules of metasedimentary rocks of the Ugakhan deposit

Петрохимические модули Petrochemical modules	Модули/Modules								
	GM HM	AM ASM	FM FM	HM SM	KM PM	NKM NAM	TM TM	ЩМ AM	ЖМ IM
Метапесчаники Metasandstone	0,23	0,18	0,05	0,25	0,12	0,37	0,05	2,14	0,23
	0,20	0,15	0,05	0,20	0,14	0,34	0,04	1,39	0,23
	0,31	0,20	0,11	0,27	0,11	0,37	0,05	2,49	0,47
Метаалевролиты Metasiltstone	0,39	0,19	0,19	0,16	0,13	0,30	0,05	1,25	0,93
	0,35	0,28	0,08	0,12	0,17	0,30	0,03	0,69	0,21
	0,34	0,19	0,19	0,25	0,07	0,33	0,07	3,44	0,68
Углеродистые сланцы Black shales	0,64	0,43	0,22	0,06	0,23	0,30	0,05	0,28	0,40
	0,54	0,36	0,17	0,07	0,20	0,27	0,05	0,35	0,43
	0,59	0,38	0,21	0,06	0,17	0,22	0,05	0,34	0,48
По данным/After data [15]	0,33	0,25	0,08	0,12	0,17	0,29	0,05	0,71	0,25
По данным/After data [16]	0,34	0,25	0,10	0,13	0,20	0,32	0,04	0,65	0,33

Примечание. Модули (расчитаны по [14]): Гидролизатный – $GM = TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + MnO / SiO_2$; Алюмокремниевый – $AM = Al_2O_3 / SiO_2$; Фемический – $FM = Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO / SiO_2$; Натриевый – $HM = Na_2O / Al_2O_3$; Калиевый – $KM = K_2O / Al_2O_3$; Нормированной щелочности – $NKM = (Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$; Титановый – $TM = TiO_2 / Al_2O_3$; Щелочной – $ЩМ = Na_2O / K_2O$; Железный – $ЖМ = (Fe_2O_3 + FeO + MnO) / TiO_2 + Al_2O_3$.

Note. Modules (calculated according to [14]): Hydrolyzate – $HM = TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + MnO / SiO_2$; Alumosilicic – $ASM = Al_2O_3 / SiO_2$; Femic – $FM = Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO / SiO_2$; Sodium – $SM = Na_2O / Al_2O_3$; Potassium – $PM = K_2O / Al_2O_3$; Normalized alkalinity – $NAM = (Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$; Titanium – $TM = TiO_2 / Al_2O_3$; Alcaline – $AM = Na_2O / K_2O$; Iron – $IM = (Fe_2O_3 + FeO + MnO) / TiO_2 + Al_2O_3$.

Таблица 4. Корреляционная матрица для петрохимических модулей метасадочных пород Угаханского месторождения

Table 4. Correlation matrix for petrochemical modules of metasediments from Ugakhan deposit

	ГМ HM	AM ASM	ФМ FM	HM SM	KM PM	HKM NAM	TM TM	ЩМ AM	ЖМ IM
ГМ HM	1,00								
AM ASM	0,94	1,00							
ФМ FM	0,84	0,63	1,00						
HM SM	-0,85	-0,89	-0,55	1,00					
KM PM	0,71	0,84	0,30	-0,89	1,00				
HKM NAM	-0,80	-0,74	-0,67	0,88	-0,56	1,00			
TM TM	0,17	-0,04	0,52	0,27	-0,44	0,03	1,00		
ЩМ AM	-0,66	-0,76	-0,27	0,93	-0,92	0,72	0,56	1,00	
ЖМ IM	0,23	-0,10	0,68	0,05	-0,31	-0,22	0,55	0,22	1,00

Примечание. Расшифровку петрохимических модулей см. Табл. 3.

Note. Interpretations of petrochemical modules see in Table 3.

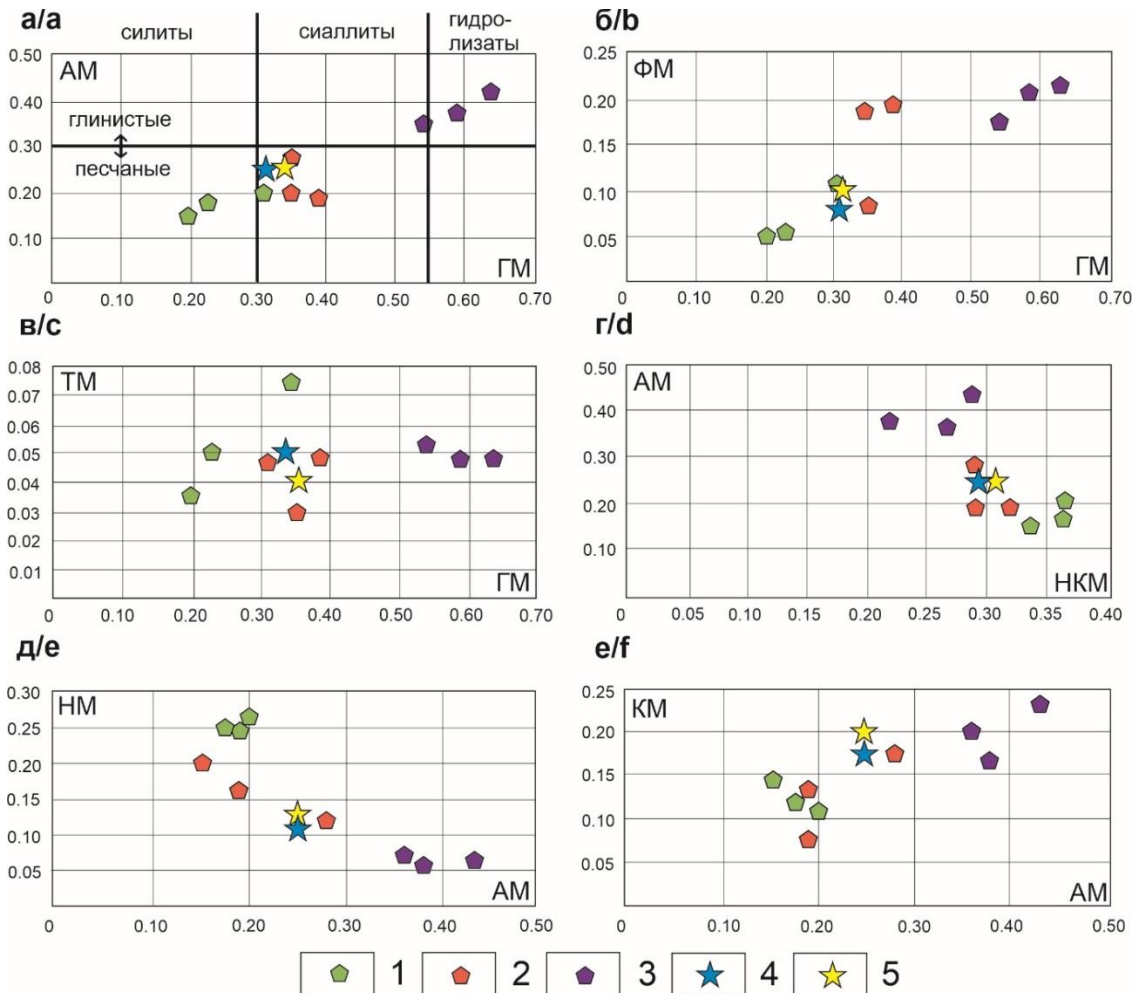


Рис. 6. Модульные диаграммы ГМ–AM (а), ГМ–ФМ (б), ГМ–ТМ (в), НКМ–AM (г), AM–HM (д) и AM–KM (е) для метасадочных пород месторождения Угахан: 1 – метапесчаники, 2 – метаалевролиты, 3 – углеродистые сланцы, 4 – данные по [16], 5 – данные по [15]

Fig. 6. HM–ASM (a), HM–FM (b), HM–TM (c), NAM–ASM (d), ASM–SM (e) and ASM–PM (f) module diagrams for metasedimentary rocks of the Ugakhan deposit: 1 – metasandstones, 2 – metasiltstones, 3 – black shales, 4 – after [16], 5 – after [15]

Для определения формационной принадлежности пород использована диаграмма ASC [30]. По параметрам, рассчитанным $A=1000 \cdot (Al_2O_3 - (CaO + K_2O + Na_2O))$, $S=1000 \cdot (SiO_2 - (Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + CaO + MgO))$ и $C=(CaO + MgO)$, металевролиты и углеродистые сланцы располагаются на границе карбонатно-углеродистой и терригенно-углеродистой формаций (рис. 7).

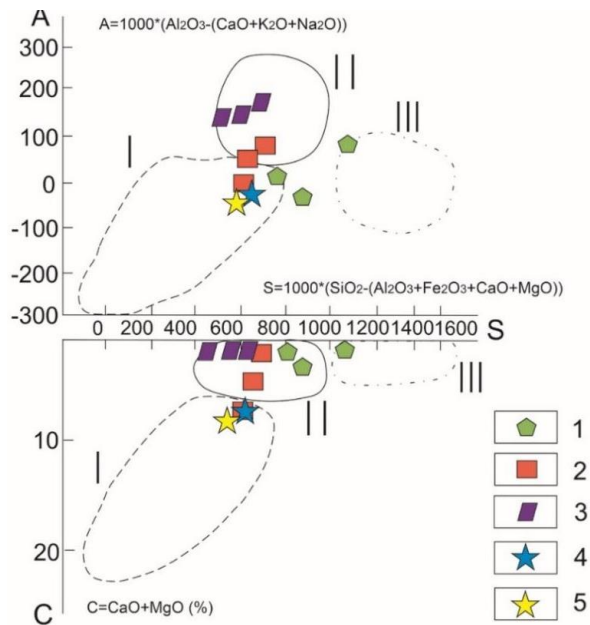


Рис. 7. Петрохимическая диаграмма ASC [30] для метаосадков месторождения Угахан: 1 – метапесчаники; 2 – металевролиты; 3 – углеродистые сланцы; 4 – данные по [16], 5 – данные по [15]. Поля составов осадочных формаций: I – карбонатно-углеродистой; II – терригенно-углеродистой; III – кремнисто-углеродистой (вулканогенно-кремнисто-углеродистой)

Fig. 7. Petrochemical ASC-diagram [6] for meta-sediments from the Ugakhan deposit: 1 – metasandstones; 2 – metasilstones; 3 – black shales; 4 – after [16], 5 – after [15]. The fields of sedimentary formations: I – carbonate-carbonaceous; II – terrigenous-carbonaceous; III – siliceous-carbonaceous (volcanogenic-siliceous-carbonaceous)

Элементы-примеси в метаосадках месторождения Угахан имеют сходные результаты, полученные для углеродсодержащих пород из других месторождений Бодайбинского рудного района [8, 15]. Увеличение содержаний большинства элементов-примесей от метапесчаников к углеродистым сланцам (табл. 1, 2) может быть объяснено как различной сорбционной способностью глинистых минералов [14], так и влиянием органического вещества на их аккумуляцию [3, 31]. Обогащение чувствительными к окислительно-восстановительному потенциалу элементами, такими как (г/т) V (до 177), Ni (до 171), Cr (до 152), Co (до 51,4), U (до 2,26), Mo (до 2,87), Cu (до 130), может быть связано с их адсорбцией на органическом материале отложений в восстановительных условиях диагенеза [31–33]. Значения отношений $V/(V+Ni)$ (0,33–0,75) и V/Cr ниже 2 (0,99–1,74) (табл. 2) указывают на

низкие содержания кислорода в бассейне седиментации [34]. Установлено, что эти элементы обладают повышенной растворимостью в окислительных условиях и пониженной растворимостью в восстановительных условиях, что приводит к обогащению пород, отложенных в условиях низкого содержания кислорода [32]. Кроме того, присутствие органического материала помогает дестабилизировать окисленные комплексы золота, тем самым фиксируя золото в иле морского дна [35]. Высокие значения Ва в метаосадках (до 3006 г/т), по мнению [27], возможно, связаны либо сульфидным диагенезом углеродистых осадков, либо с окислением накопленного в них пирита. В обоих случаях должны генерироваться дополнительные количества SO_4^{2-} , необходимые для фиксации Ba^{2+} в форме барита. По данным [1] также указывается, что бужихтинская свита характеризуется маркирующими высокими содержаниями Ва.

Появление повышенных содержаний W (до 20,4 г/т) в метапесчаниках объясняется присутствием акцессорного шеелита [4]. Повышенные содержания Rb (до 180 г/т) и Ga (до 32,5 г/т) в метаосадках, вероятно, связано с изоморфным вхождением их в структуру мусковита и характеризует наличие флюида в формировании пород, образование которого спровоцировано гранитоидным магматизмом [36]. Повышенные содержания Zr (до 167 г/т) и Th (до 12,1 г/т) отражают присутствие значительного количества терригенного компонента. Например, доказана способность Th сорбироваться органическими соединениями, однако решающее значение в его накоплении имеет состав терригенного материала [14]. Высокие содержания Sr в изученных породах объясняются его включением в диагенетический карбонат с образованием анкилита [19].

Повышенные содержания и преобладание легких (ЛРЗЭ) над тяжелыми (ТРЗЭ) РЗЭ в изученных породах связано с присутствием их собственных минеральных форм. ЛРЗЭ обычно входят в состав монацита, РЗЭ-эпидота, бастнезита, анкилита, а ТРЗЭ связаны с цирконом, ксенотимом, коффинитом, торитом, уранинитом. Оптимальные условия для высвобождения, миграции и фиксации РЗЭ в богатых органикой отложениях, вероятно, были достигнуты в диагенетических процессах.

Преобладание ЛРЗЭ над ТРЗЭ в спектре РЗЭ, нормированном на NASC, и наличие отрицательной аномалии Се ($Se/Se^*=0,39-0,78$) могут быть идентифицированы как присутствие преобразованной терригенной глинистой фракции в изученных отложениях [37]. Известно, что аномалии Се в древних отложениях являются эффективными индикаторами вековых изменений окислительно-восстановительных условий и определяются соотношением аутигенных и детритовых терригенных минералов, а также могут указывать на поступление терригенных пород в кислородную среду [35, 38].

Появление Eu-аномалии в спектре РЗЭ, по мнению [39, 40], может свидетельствовать об относительной восстановленности флюида. Фракционирование аллана в осадках также могло вызвать небольшие анома-

лии Eu [41]. Также известно, что при ИСП-МС анализах из-за электронного заряда и аналогичного радиуса катиона Eu^{2+} и Ba^{2+} в барите или Eu^{2+} и Sr^{2+} в составе магматических Са-плагиоклазов наблюдается положительная Eu-аномалия [42–45]. В связи с этим высокие содержания Ba (до 3006 г/т) и Sr (до 387 г/т) в пробах не отрицают влияние барита и полевых шпатов на положительную Eu-аномалию в изученных породах. Однако не исключается вероятность восстановления Eu^{3+} во время диагенеза, где существовало много органического углерода и восстановительного сульфата [46–49].

Таким образом, полученные минералого-геохимические исследования метаосадков изученных пород предполагают, что породы месторождения были отложены в условиях континентальной окраины за счет размыва и переотложения материала древней платформы и продуктов вулканической деятельности. Участие органического вещества в процессах диагенеза первичных обломочных осадков и их дальнейшие преобразования под влиянием метаморфогенно-гидротермальных процессов являются основополагающими факторами при формировании метаосадков бужуйхтинской свиты.

Выводы

1. Метапесчаники, метаалевролиты и углеродистые сланцы бужуйхтинской свиты на месторождении Угахан, сложенные слабоокатанными зернами кварца и полевыми шпатами (альбитом и ортоклазом), сцементированными слюдястым материалом (мусковитом и серицитом), хлоритом и карбонатами в разных соотношениях, являются продуктами размыва, переотложения и преобразования материала древней платформы и продуктов вулканической деятельности.
2. Характерной чертой метаосадков является присутствие многочисленных фрагментов микрофоссилий и аксессуарной минерализации (циркон, торит, уранинит, коффинит, анкилит, бастнезит, монацит, ксенотим, минералы ряда содержащих редкие земли эпидот и алланит, титанит, а также со-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Единая неопротерозойская-раннепалеозойская эволюция рудоносных осадочных комплексов юга сибирского кратона / А.Е. Будяк, С.Ю. Скузоватов, Ю.И. Тарасова, К.Л. Ванг, Н.А. Горячев // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 484. – № 3. – С. 335–339.
2. Немеров В.К., Станевич А.М. Эволюция рифей-вендских обстановок биолитогенеза Байкальской горной области // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – № 3. – С. 456–470.
3. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона / В.К. Немеров, А.М. Станевич, Э.А. Развозжаева, А.Е. Будяк, Т.А. Корнилова // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – № 5. – С. 729–747.
4. Иванов А.И. Золотоносность Байкало-Патомской металлогенической провинции: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 2010. – 348 с.
5. К методике оценки прогнозных ресурсов рудного золота в углеродистых карбонатно-терригенных отложениях Бодайбинского рудного района / В.Д. Конкин, А.И. Иванов, Е.Е. Котельников, В.Е. Васюков, И.О. Захаров // Отечественная геология. – 2017. – № 4. – С. 64–80.
6. Новые данные о геолого-структурных особенностях золото-рудных месторождений Ожерелье, Бйканское, Угахан и Голец

держащие редкие земли уранинит и коффинит), представленной как реликтовыми, так и новообразованными формами, отражающими изменения минерального состава первичных осадков от стадии седиментогенеза-диагенеза и завершая метаморфогенно-гидротермальными процессами.

3. Рудовмещающая толща месторождения характеризуется некоторыми колебаниями в содержании основных породообразующих компонентов, отражающими ее слоистый характер. Сравнительный анализ метаосадков показывает, что содержания большинства элементов-примесей увеличиваются в ряду метапесчаники → метаалевролиты → углеродистые сланцы. Маркирующими элементами-примесями в отложениях бужуйхтинской свиты являются повышенные содержания редокс-чувствительных элементов (V, Cr, Co, Ni, Th, U, Mo), аккумуляция которых происходила под влиянием органического вещества. Высокие содержания Rb и Ga в метаосадках являются свидетельством влияния флюида в их формировании, образование которого спровоцировано гранитоидным магматизмом. Аномально высокие содержания Ba, Sr и редких земель являются отличительной чертой бужуйхтинской свиты.
4. Последовательность образования редкоземельных минералов, а также их спектры (обогащение легкими редкоземельными элементами по сравнению с тяжелыми), наличие отрицательной Ce и положительной Eu аномалий показывают, что оптимальные условия для высвобождения, миграции и фиксации редкоземельной минерализации в богатых органикой отложениях были достигнуты в условиях диагенетических процессов с низким уровнем кислорода.

Авторы выражают благодарность научным сотрудникам ЮУ ФНЦ МиГ УрО кандидату геолого-минералогических наук Ксении Александровне Филипповой и Михаилу Анатольевичу Рассомахину за выполнение аналитических работ. Исследования выполнены в рамках государственной темы ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН № 122031600292-6.

- Высочайший / В.Н. Бабяк, А.В. Блинов, Ю.И. Тарасова, А.Е. Будяк // Науки о Земле и недропользовании. – 2019. – Т. 42. – № 4. – С. 388–412.
7. Буряк В.А., Бакулин Ю.И. Металлогения золота. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 403 с.
8. Минералого-геохимическая характеристика углеродистых толщ золоторудных объектов Артемовского узла (Бодайбинский район) / Е.Е. Паленова, Е.В. Белогуб, К.А. Новоселов, М.В. Заботина // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской Академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2013. – Т. 43. – № 2. – С. 29–36.
9. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb изотопного SHRIMP-датирования аксессуарных минералов / М.А. Юдовская, В.В. Дистлер, Н.В. Родионов, А.В. Мохов, А.В. Антонов, С.А. Сергеев // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53. – № 1. – С. 32–64.
10. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits / R.R. Large, L. Danyushevsky, C. Hollit, V. Maslennikov // Economic Geology. – 2009. – V. 104. – P. 635–668.
11. Age and pyrite Pb isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia / S. Meffre, R.R. Large,

- R. Scott, J. Woodhead, Z. Chang, S.E. Gilbert, L.V. Danyushevsky, V. Maslennikov, J.M. Hergt // *Geochimica et Cosmochimica Acta* – 2008. – V. 72. – P. 2377–2391.
12. Detrital zircon U–Pb ages of Paleo- to Neoproterozoic black shales of the Baikal-Patom Highlands in Siberia with implications to timing of metamorphism and gold mineralization / E.E. Palenova, M.A. Yudovskaya, D. Frei, N.V. Rodionov. // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2019. – V. 174. – P. 37–58.
13. Поисковые работы на рудное золото в северной части Кропоткинского рудного поля (Иркутская область) / А.И. Иванов, Ю.Л. Агеев, Д.И. Калинина, А.В. Климанский. – Иркутск: филиал ФГУ «ТФГИ по Сибирскому федеральному округу», 2010. – 159 с.
14. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Элементы-примеси в черных сланцах. – Екатеринбург: Наука «Урал», 1994. – 303 с.
15. Изотопные (Sm–Nd, Pb–Pb и $\delta^{34}\text{S}$) и геохимические характеристики метасадочных пород Байкало-Патомского пояса (Северное Забайкалье) и эволюция осадочного бассейна в неопротерозойское время / А.В. Чугаев, А.Е. Будяк, И.В. Чернышев, Е.О. Дубинина, Б.И. Гареев, К.Н. Шатагин, Ю.И. Тарасова, Н.А. Горячев, С.Ю. Скузоватов // *Петрология*. – 2018. – Т. 26. – № 3. – С. 213–244.
16. Блинов А.В., Тарасова Ю.И. Минералого-петрографическая характеристика Угаханского месторождения // *Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых*. – 2020. – Т. 43. – № 2. – С. 160–176.
17. Торий-уран редкоземельная минерализация Угаханского золоторудного месторождения в углеродистых сланцах, Бодайбинский рудный район (Иркутская обл.) / Е.В. Шепель, Н.Р. Аюпова, М.А. Рассомахин, П.В. Хворов // *Минералогия*. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 78–93.
18. Henderson P. Rare earth element geochemistry. – Oxford: *Developments in Geochemistry*, Elsevier, 1984. – 277 с.
19. The «North American shale composite»: its compilation, major and trace element characteristics / L.P. Gromet, R.F. Dymek, L.A. Haskin, R.L. Korotev // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1984. – V. 48. – P. 2469–2482.
20. Кондратенко А.К. Магматические комплексы центральной части Ленской провинции и их металлогеническая специализация. – М.: Недра, 1977. – 144 с.
21. Этапы формирования крупномасштабной благороднометалльной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия): результаты изотопно-геохронологического изучения / Н.П. Лаверов, И.В. Чернышев, А.В. Чугаев, Э.Д. Байрова, Ю.В. Голыман, В.В. Дистлер, М.А. Юдовская // *Доклады Академии наук*. – 2007. – Т. 415. – № 2. – С. 236–241.
22. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе / В.Л. Русинов, О.В. Русина, С.Г. Кражев, Ю.В. Щегольков, Э.И. Алышева, С.Е. Борисовский // *Геология рудных месторождений*. – 2008. – Т. 50. – № 1. – С. 3–46.
23. Буряк В.А. Метасоматизм и рудообразование. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
24. 40Ar–39Ar and Rb–Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia) / A.V. Chugaev, A.E. Budyak, Yu. O. Larionova, I.V. Chernyshev, A.V. Travin, Yu.I. Tarasova, V.I. Gareev, G.A. Batalin, I.V. Rassokhina, T.I. Oleinikova // *Ore Geology Reviews*. – 2022. – V. 144. – P. 104855.
25. Онищенко С.А., Сокина Н.В. Особенности формирования золоторудного Черносланцевого месторождения Голец Высочайший (Бодайбинский рудный район) // *Геология рудных месторождений*. – 2021. – Т. 63. – № 2. – С. 154–173.
26. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. – СПб: Наука, 2000. – 479 с.
27. Юдович Я.Э. Курс геохимии осадочных пород (избранные главы). – Сыктывкар: Изд-во Сыктывкарского ун-та, 2001. – 284 с.
28. Паленова Е.Е. Минералогия месторождений золота Копыловское. Кавказ. Красное (Артемовский рудный узел. Бодайбинский район): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Миасс, 2015. – 202 с.
29. Юдович Я.Э., Беляев А.А., Кетрис М.П. Геохимия и рудогенез черных сланцев Пай-Хоя. – СПб: Наука, 1998. – 366 с.
30. Горбачев О.В., Созинов Н.А. Некоторые петрохимические и геохимические аспекты типизации углеродистых отложений докембрия // *Проблемы осадочной геологии докембрия*. – 1985. – № 10. – С. 46–57.
31. Algeo T.J., Maynard J.B. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothem // *Chemical Geology*. – 2004. – V. 206. – P. 289–318.
32. Brumsack H.J. Geochemistry of recent TOC-rich sediments from the Gulf of California and the Black Sea // *Geologische Rundschau*. – 1989. – V. 78. – № 3. – P. 851–882.
33. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies / N. Tribouillard, T.J. Algeo, T. Lyons, A. Riboulleau // *Chemical Geology*. – 2006. – V. 232. – P. 12–32.
34. Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indexes used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones // *Chemical Geology*. – 1994. – V. 111. – P. 111–129.
35. Tomkins A.G. On the source of orogenic gold // *Geology*. – 2013. – V. 41. – № 12. – P. 1255–1256. URL: <https://doi.org/10.1130/focus122013.1> (дата обращения 15.05.2022).
36. Petrology, geochemistry and petrogenesis of the Keping basalts and their Nd, Sr and Pb isotopic compositions / C.Y. Jiang, P.B. Zhang, D.R. Lu, K.Y. Bai, Y.P. Wang, S.H. Tang, J.H. Wang, C. Yang // *Geological Review*. – 2004. – V. 50. – P. 492–500.
37. Zhang K., Shields G.A. Sedimentary Ce anomalies: Secular change and implications for paleoenvironmental evolution // *Earth-Science Reviews*. – 2022. – V. 229. – P. 104015.
38. Evaluating the fidelity of the cerium paleoredox tracer during variable carbonate diagenesis on the Great Bahamas Bank / X.M. Liu, D.S. Hardisty, T.W. Lyons, P.K. Swart // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2019. – V. 248. – P. 25–42.
39. Луканин О.А., Дернов-Пегарев В.Ф. Основные факторы, определяющие появление европиевой аномалии во флюидах, образующихся при дегазации гранитных магм, вызванной снижением давления // *Вестник отделения наук о Земле РАН*. – 2009. – Т. 1. – № 27. – С. 1–3.
40. Bau M. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid rock interaction and significance of the oxidation state of europium // *Chemical Geology*. – 1991. – V. 93. – № 3–4. – С. 219–230.
41. Fairbridge R.W. Syndiagenesis–anadiagenesis–epidiagenesis: phases of lithogenesis // *Diagenesis in Sediments and Sedimentary Rocks* / Eds. G. Larsen, G.V. Chilingar. – The Netherlands, Amsterdam: Elsevier, 1983. – V. 2. – P. 17–113.
42. Chao C., Fu Q., Wang X. Linear correlation of Ba and Eu contents by hydrothermal activities: a case study in the Hetang Formation, South China // *Geofluids*. – 2019. – V. 3. – P. 1–15.
43. Rare earth element geochemistry of feldspars: examples from Fe-oxide Cu–Au systems in the Olympic Cu–Au Province, South Australia / A. Kontonikas-Charos, C.L. Ciobanu, N.J. Cook, K. Ehrig, S. Krneta, V.S. Kamenetsky // *Mineralogy and Petrology*. – 2018. – V. 112. – P. 145–172.
44. McLennan S.M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes // *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. Reviews in mineralogy*. – 1989. – V. 21. – P. 169–200.
45. Morgan J.W., Wandless G.A. Rare earth element distribution in some hydrothermal minerals: Evidence for crystallographic control. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1980. – V. 44. – P. 973–980.
46. Diagenesis of the Vaca Muerta Formation, Neuquén Basin: Evidence from petrography, microthermometry and geochemistry / M.R. del Lanz, K. Azmy, N.N. Cesaretti, N.B. Fortunati // *Marine and Petroleum Geology*. – 2021. – V. 124. – P. 120–135.
47. MacRae N.D., Nesbitt H.W., Kronberg B.I. Development of a positive Eu anomaly during diagenesis // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1992. – V. 109. – P. 585–591.
48. Sverjensky D.A. Europium redox equilibria in aqueous solution // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1984. – V. 67. – P. 70–78.
49. Origin of early Cambrian black-shale-hosted barite deposits in South China: mineralogical and geochemical studies / S. Han, K. Hu, J. Cao, J. Pan, F. Xia, W. Wu // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2015. – V. 106. – P. 79–94.

Поступила: 01.06.2022 г.
Дата рецензирования: 14.10.2022 г.

Информация об авторах

Шепель Е.В., инженер-исследователь Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

Аюпова Н.Р., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН; доцент филиала Южно-Уральского государственного университета в г. Миассе.

UDC 553.4

MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF THE ORE BEARING STRATA OF THE UGAKHAN DEPOSIT FROM BODAIBO ORE REGION, RUSSIA

Elena V. Shepel¹,
liena-safina@mail.ru

Nuriya R. Ayupova^{1,2},
aupova@mineralogy.ru

¹ Institute of Mineralogy of South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Ilimensky reserve, Miass, 456317, Russia.

² South Ural State University, Branch in Miass, 16, Oktyabrya avenue, Miass, 456304, Russia.

The relevance of the study is caused by the interest in the gold deposits located in the Bodaibo ore region. The study of this area is reflected in numerous publications, despite this there is no unified idea of the origin of gold deposits formed in the black shale strata. The Ugakhan deposit is the only gold ore object of the Bodaibo ore region localized in the rocks of the Buzhuikhta Formation, and the detailed mineralogical and geochemical study of this ore host strata can be useful to clarify genetic type of gold mineralization and the prospects of the Buzhuikhta Formation for the search for new gold objects.

The main aim is clarification of the conditions of the lithogenesis in the concentration of metals in sulfide-bearing metasedimentary rocks of the Buzhuikhta Formation.

Objects of the research is the Ugakhan deposit, located in the Irkutsk region of the Bodaibo ore region.

Methods. The study of rocks was carried out using an Olympus BX51 optical microscope. The accessory mineralization was analyzed on a Tescan Vega 3 sbu scanning electron microscope equipped with an Oxford Instruments X-act energy dispersive spectrometer. The content of 12 basic oxides in rocks (9 samples) was determined by silicate analysis. The trace elements, including rare earth elements (6 samples, 40 elements), were studied by the ICP-MS method (inductively coupled plasma mass spectrometry) on the ICP-MS Agilent 7700x spectrometer (Japan). All mineralogical and geochemical researches were carried out at the Institute of Mineralogy of South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS (Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS, Miass).

Results. Ore-bearing rocks from the Ugakhan deposit are represented by intercalation of metasandstones, metasilstones and black shales. The detrital material in these rocks consists of weakly rounded quartz grains and feldspars (albite and orthoclase) and fragments of microfossils in the micaceous-chlorite-carbonate groundmass. The accessory minerals are tourmaline, zircon, rutile, apatite, titanite, numerous minerals of rare earth elements (monazite, xenotime, rare earth elements-bearing epidote, bastnaesite, ankyllite, rare earth elements-bearing thorite, uraninite and coffinite). The sequence of mineral formation testifies to the redistribution of the initially accumulated matter and its concentration with the formation of mineral forms of rare earth elements, Th and U at all stages of lithogenesis and the metamorphogenic-hydrothermal stage of primary carbonaceous sediment transformations. A comparative analysis of the chemical composition of metasediments shows that a decrease in SiO₂ contents is accompanied by an increase in Al₂O₃, MgO, TiO₂, FeO*, K₂O, and P₂O₅ contents in the range: metasandstones → metasilstones → black shales. In the same range, there is an increase in the contents of Sc, V, Cr, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Th, U and rare earth elements. A specific feature of metasediments of the Buzhuikhta Formation is the high content of V, Ba, Sr, rare earth elements, Th and U, which is caused by the participation of organic matter in diagenetic processes involving sulfides. The calculated petrochemical modules and their correlations testify to the common nature of sedimentary material and the possible influence of volcanogenic material in formation of sediments.

Key words:

Metasedimentary rocks, mineral associations, trace elements, gold deposit, Bodaibo ore district.

The authors are grateful to Cand. Sc. Ksenia A. Filippova for ICP-MS analyses and Mikhail A. Rassomakhin for SEM-EDS analyses. This work was supported by the State contract of Institute of Mineralogy of SU FRC MG of UB RAS no. 122031600292-6.

REFERENCES

- Budyak A.E., Skuzovatov S.Yu., Tarasova Yu.I., Wang K-L., Goryachev N.A. Common Neoproterozoic-early Paleozoic evolution of ore-bearing sedimentary complexes in the southern Siberian craton. *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 484, no. 3, pp. 335–339. In Rus.
- Nemerov V.K., Stankevich A.M. Evolution of Riphean-Vendian environments of biolithogenesis of the Baikal mountain region. *Geology and geophysics*, 2001, vol. 42, no. 3, pp. 456–470. In Rus.
- Nemerov V.K., Stankevich A.M., Razvozhayeva E.A., Budyak A.E., Kornilova T.A. Biogenic-sedimentation factors of ore formation in Neoproterozoic strata of the Baikal-Patom region. *Geology and geophysics*, 2010, vol. 51, no. 5, pp. 729–747. In Rus.
- Ivanov A.I. *Zolotonosnost Baikalo-Patomskoy metallogenicheskoy provintsii*. Diss. Dokt. nauk [Gold content of the Baikal-Patom metallogenic province. Dr. Diss.]. Moscow, 2010. 348 p.
- Konkin V.D., Ivanov A.I., Kotelnikov E.E., Vasyukov V.E., Zakharov I.O. To the methodology of estimating the forecast resources of ore gold in carbonaceous carbonate-terrigenous deposits of the Bodaibinsky ore district. *Domestic Geology*, 2017, no. 4, pp. 64–80. In Rus.
- Babyak V.N., Blinov A.V., Tarasova Y.I., Budyak A.E. New data on the geological and structural features of the Ozherlie, Ykanskoie, Ugakhan and Golets Vysochaishy gold fields. *Earth sciences and subsurface use*, 2019, vol. 42, no. 4, pp. 388–412. In Rus.
- Buryak V.A., Bakulin Y.I. *Metallogeniya zolota* [Gold metallogeny]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1998. 403 p.
- Palenova E.E., Belogub E.V., Novoselov K.A., Zabolotina M.V. Mineralogical and geochemical characteristics of carbonaceous strata of gold ore objects of the Artemovskiy node (Bodaibinsky district). *Proceedings of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology*,

- prospecting and exploration of ore deposits, 2013, vol. 43, no. 2, pp. 29–36. In Rus.
9. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. Correlation of metamorphism and ore formation processes at the Sukhoi Log gold black shale Deposit according to U-Th-Pb isotope SHRIMP Dating of accessory minerals. *Geology of ore deposits*, 2011, vol. 53, no. 1, 32–64. In Rus.
 10. Large R.R., Danyushevsky L.V., Hollit C., Maslennikov V. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: Implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits. *Economic Geology*, 2009, vol. 104, pp. 635–668.
 11. Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V., Hergt J.M. Age and pyrite Pb isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit. Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, vol. 72, pp. 2377–2391.
 12. Palenova E.E., Yudovskaya M.A., Frei D., Rodionov N.V. Detrital zircon U–Pb ages of Paleo- to Neoproterozoic black shales of the Baikal-Patom Highlands in Siberia with implications to timing of metamorphism and gold mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, vol. 174, pp. 37–58.
 13. Ivanov A.I., Ageev Y.L., Kalinina D.I., Klimansky A.V. *Poiskovye raboty na rudnoe zoloto v severnoy chasti Kropotkinskogo rudnogo polya – Irkutskaya oblast* [Prospecting for gold in the northern part of the Kropotkinskoe ore field (Irkutsk region)]. Irkutsk, Branch of the Federal State Institution «TFGI for the Siberian Federal district» Publ., 2010. 159 p.
 14. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Elementy-primesi v chernykh slantsakh* [Elements-impurities in black shales]. Yekaterinburg, Nauka «Ural» Publ., 1994. 303 p.
 15. Chugaev A.V., Budyak A.E., Chernyshev I.V., Dubinina E.O., Gareev B.I., Shatagin K.N., Tarasova Yu.I., Goryachev N.A., Skuzovatov S.Yu. Isotopic (Sm-Nd, Pb-Pb and $\delta^{34}\text{S}$) and geochemical characteristics of meta-sedimentary rocks of the Baikal-Atom belt (Northern Transbaikalia) and the evolution of the sedimentary basin in the Neoproterozoic. *Petrology*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 213–244. In Rus.
 16. Blinov A.V., Tarasova Yu.I. Mineralogical and petrographic characteristics of the Ugahan deposit. *Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits*, 2020, vol. 43, no 2, pp. 160–176. In Rus.
 17. Shepel E.V., Ayupova N.R., Rassomakhin M.A., Khvorov P.V. Thorium-uranium rare-earth mineralization of the Ugakhansk gold deposit in carbonaceous shales, Bodaibinsky ore district (Irkutsk region). *Mineralogy*, 2021, vol. 7, no. 3, pp. 78–93.
 18. Henderson P. *Rare earth element geochemistry*. Oxford, Developments in Geochemistry. Elsevier, 1984. 277 p.
 19. Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The «North American shale composite»: its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, vol. 48, pp. 2469–2482.
 20. Kondratenko A.K. *Magmaticheskie komplekсы tsentralnoy chasti Lenskoy provintsiy i ikhmetallo genicheskaya spetsializatsiya* [Magmatic complexes of the central part of the Lena province and their metallogenic specialization]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 144 p.
 21. Laverov N.P., Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Bairova E.D., Goltsman Yu.V., Distler V.V., Yudovskaya M.A. Formation stages of the largescale noble metal mineralization in the Sukhoi Log deposit, East Siberia: results of isotope-geochronological study. *Doklady Earth Sciences*, 2007, vol. 415, no. 2, pp. 236–241. In Rus.
 22. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shchegolkov Yu.V., Malysheva E.I., Borisovsky S.E. Near-ore metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in the Lena gold ore district. *Geology of Ore Deposits*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 3–46. In Rus.
 23. Budyak V.A. *Metamorfizm i rudoobrazovanie* [Metamorphism and ore formation]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 256 p.
 24. Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Yu.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Yu.I., Gareev B.I., Batalin G.A., Ras-sokhina I.V., Oleinikova T.I. 40Ar-39Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia). *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 144, pp. 104855.
 25. Onishchenko S.A., Sokerin A.N.V. Features of the formation of the gold-ore Chernoslant deposit Golets the Highest (Bodaybinsky ore district). *Geology of ore deposits*, 2021, vol. 63, no. 2, pp. 154–173. In Rus.
 26. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Osnovy litokhimii* [Fundamentals of lithochemistry]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2000. 479 p.
 27. Yudovich Ya.E. *Kurs geokhimii osadochnykh porod (izbrannye glavy)* [Course of geochemistry of sedimentary rocks (selected chapters)]. Syktyvkar, Syktyvkar University Publ. house, 2001. 284 p.
 28. Palenova E.E. *Mineralogiya mestorozhdeniy zolota Kopylovskoe, Kavkaz, Krasnoe (Artemovskiy rudny uzel. Bodaybinskiy rayon)*. Diss. Kand. nauk [Mineralogy of gold deposits Kopylovskoe. Caucasus. Krasnoe (Artemovsky ore node. Bodaibinsky district). Cand. Diss.]. Miass, 2015. 202 p.
 29. Yudovich Ya.E., Belyaev A.A., Ketris M.P. *Geokhimiya i rudogenez chernykh slantsev Pay-Hoya* [Geochemistry and ore genesis of the Pai-Khoi black shales]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1998. 366 p.
 30. Gorbachev O.V., Sozinov N.A. Nekotorye petrokhimicheskie i geokhimicheskie aspekty tipizatsii uglerodistykh otlozheniy dokembriya [Some petrochemical and geochemical aspects of typification of Precambrian carbonaceous deposits]. *Problems of sedimentary geology of the Precambrian*, 1985, no. 10, pp. 46–57.
 31. Algeo T.J., Maynard J.B. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems. *Chemical Geology*, 2004, vol. 206, pp. 289–318.
 32. Brumsack H.J. Geochemistry of recent TOC-rich sediments from the Gulf of California and the Black Sea. *Geologische Rundschau*, 1989, vol. 78, no. 3, pp. 851–882.
 33. Tribouillard N., Algeo T.J., Lyons T., Riboulleau A. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies. *Chemical Geology*, 2006, vol. 232, pp. 12–32.
 34. Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indexes used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 1994, vol. 111, pp. 111–129.
 35. Tomkins A.G. On the source of orogenic gold. *Geology*, 2013, vol. 41, no. 12, pp. 1255–1256. Available at: <https://doi.org/10.1130/focus122013.1> (accessed 15 May 2022).
 36. Jiang C.Y., Zhang P.B., Lu D.R., Bai K.Y., Wang Y.P., Tang S.H., Wang J.H., Yang C. Petrology, geochemistry and petrogenesis of the Keping basalts and their Nd, Sr and Pb isotopic compositions. *Geological Review*, 2004, vol. 50, pp. 492–500.
 37. Zhang K., Shields G.A. Sedimentary Ce anomalies: Secular change and implications for paleoenvironmental evolution. *Earth-Science Reviews*, 2022, vol. 229, pp. 104015.
 38. Liu X.M., Hardisty D.S., Lyons T.W., Swart P.K. Evaluating the fidelity of the cerium paleoredox tracer during variable carbonate diagenesis on the Great Bahamas Bank. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, vol. 248, pp. 25–42.
 39. Lukanin O.A., Dernov-Pegarev V.F. The main factors determining the appearance of the europium anomaly in fluids formed during degassing of granitic magmas caused by a decrease in pressure. *Bulletin of the Earth Sciences Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2009, vol. 1, no. 27, pp. 1–3. In Rus.
 40. Bau M. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid rock interaction and significance of the oxidation state of europium. *Chemical Geology*, 1991, vol. 93, no. 3–4, pp. 219–230.
 41. Fairbridge R.W. Syndiagenesis—an adidiagenesis—epidiagenesis: phases of lithogenesis. *Diagenesis in Sediments and Sedimentary Rocks*. Eds. G. Larsen, G.V. Chilingar. The Netherlands, Amsterdam, Elsevier, 1983. Vol. 2, pp. 17–113.
 42. Chao C., Fu O., Wang X. Linear correlation of Ba and Eu contents by hydrothermal activities: a case study in the Hetang formation, South China. *Geofluids*, 2019, vol. 3, pp. 1–15.
 43. Kontonikas-Charos A., Ciobanu C.L., Cook N.J., Ehrig K., Krneta S., Kamenetsky V.S. Rare earth element geochemistry of feldspars: examples from Fe-oxide Cu-Au systems in the Olympic Cu-Au Province, South Australia. *Mineralogy and Petrology*, 2018, vol. 112, pp. 145–172.
 44. McLennan S.M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. Reviews in mineralogy*, 1989, vol. 21, pp. 169–200.

45. Morgan J.W., Wandless G.A. Rare earth element distribution in some hydrothermal minerals: Evidence for crystallographic control. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, vol. 44, pp. 973–980.
46. Del Lanz M.R., Azmy K., Cesaretti N.N., Fortunatti N.B. Diagenesis of the Vaca Muerta Formation, Neuquén Basin: evidence from petrography, microthermometry and geochemistry. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, vol. 124, pp. 120–135.
47. MacRae N.D., Nesbitt H.W., Kronberg B.I. Development of a positive Eu anomaly during diagenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, vol. 109, pp. 585–591.
48. Sverjensky D.A. Europium redox equilibria in aqueous solution. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, vol. 67, pp. 70–78.
49. Han S., Hu K., Cao J., Pan J., Xia F., Wu W. Origin of early Cambrian black-shale-hosted barite deposits in South China: mineralogical and geochemical studies. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, vol. 106, pp. 79–94.

Received: 1 June 2022.

Reviewed: 14 October 2022.

Information about the authors

Elena V. Shepel, research engineer, Institute of Mineralogy of South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS.

Nuriya R. Ayupova, Cand. Sc., leading researcher, Institute of Mineralogy of South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS; associate professor, South Ural State University, Branch in Miass.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректурa и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 28.01.2023. Дата выхода журнала: 30.01.2023.
Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 26,29. Уч.-изд. л. 23,78.
Заказ 13-23. Тираж 500 экз. Цена свободная.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, каб. 139.