

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»



ISSN 1684-8519

ИЗВЕСТИЯ

ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Том 324, № 1, 2014

Науки о Земле

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ
г. Томск

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Науки о Земле

Савичев О.Г., редактор серии, д-р географ. 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)
Шварцев С.Л., д-р геол.-минерал. наук (Россия)

Математика и механика. Физика

Никитенков Н.Н., редактор серии, д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., канд. физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленек О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Рожкова С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)

Химия

Коршунов А.В., редактор серии, канд. хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc. (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc. (Южная Корея)
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)

Энергетика

Заворин А.С., редактор серии, д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc. (Нидерланды)
Кабов О.А., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Маренго М., PhD (Италия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)

Управление, вычислительная техника и информатика

Кочегуров А.И., редактор серии, канд. техн. наук (Россия)
Хамкер Ф.Х., Dsc. (Германия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)

Экономика. Философия, социология и культурология. История

Барышева Г.А., редактор серии, д-р экон. наук (Россия)
Завадскас Э.К., DSc (Литва)
Казатти Ф., PhD (Италия)
Грюнвальд А., PhD (Германия)
Бутовская М.Л., д-р ист. наук (Россия)
Головаха Е.И., д-р филос. наук (Украина)

Пестряков А.Н., гл. редактор, д-р хим. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, канд. техн. наук (Россия)
Кирыанова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)

Издается с 1903 г.

Журнал зарегистрирован Министерством
Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № 77-16615 от 24 октября 2003 г.
Учредитель: Томский политехнический университет

ISSN 1684-8519

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2014

BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

EDITORIAL BOARD

Earth sciences

Savichev O.G., section editor, Dr. Sc. (Russia)
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)
Kontorovich A.Eh., Dr. Sc. (Russia)
Shvartsev S.L., Dr. Sc. (Russia)

Mathematics and mechanics. Physics

Nikitenkov N.N., section editor, Dr. Sc. (Russia)
Silkin V.M., Cand. Sc. (Spain)
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)
Rozhkova S.V., Dr. Sc. (Russia)

Chemistry

Korshunov A.V., section editor, Cand. Sc. (Russia)
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
Teipel U., Dsc. (Germany)
Jin-Chun Kim, Dsc. (South Korea)
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)

Power Engineering

Zavorin A.S., section editor, Dr. Sc. (Russia)
Hanjalic K., Dsc. (Netherlands)
Kabov O.A., Dr. Sc. (Russia)
Marengo M., PhD (Italy)
Alekseenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)

Control, computer science and technology

Kochegurov A.I., section editor, Cand. Sc. (Russia)
Hamker F.H., Dsc. (Germany)
Rui D., PhD (Portugal)
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)

Economics. Philosophy, social science and cultural studies. History

Barysheva G.A., section editor, Dr. Sc. (Russia)
Zavadskas E.K., DSc (Lithuania)
Casati F., PhD (Italy)
Grunwald A., PhD (Germany)
Butovskaya M.L., Dr. Sc. (Russia)
Golovakha E.I., Dr. Sc. (Ukraine)

Pestryakov A.N., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, Cand. Sc. (Russia)
Kiryanova, managing editor, Cand. Sc. (Russia)

Подписной индекс по каталогу
Агентства «Роспечать» – 18054

Полнотекстовый доступ к электронной версии
журнала возможен на сайтах ТПУ: portal.tpu.ru/izvestiya/;
ООО «Научная электронная библиотека»:
www.elibrary.ru, www.e-library.ru,
а также поисковой системы scholar.google.com

Импакт-фактор РИНЦ 2012 г. 0,292

© Tomsk Polytechnic University, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

МИНЕРАЛОГИЯ

- Типоморфизм акцессорного титаномagnetита девонских гранитоидов северо-западной части Рудного Алтая
Новоселов К.Л., Туркин Ю.А.

ОБЩАЯ ГЕОЛОГИЯ

- Эндогенные и экзогенные факторы в процессах эрозии, переноса и аккумуляции осадков на северо-восточном шельфе острова Сахалин
Ильин В.В.

ЛИТОЛОГИЯ

- Литология и особенности формирования вендских отложений в Юго-Восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы
Ковешников А.Е., Конторович В.А., Макаренко С.Н., Татьянин Г.М., Терлеев А.А., Токарев Д.А.
- Геохимическое и литологическое обоснование концепции «главного источника» доюрских залежей нефти Краснотеннинского свода (Тюменская область)
Кузина М.Я., Коржов Ю.В., Исаев В.И.

ГЕОЛОГИЯ И ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

- Прогнозно-поисковый комплекс для мезотермальных месторождений золота. Ч. 3. Петрохимический и геохимический критерии
Кучеренко И.В.
- Фациальные особенности и магнитная восприимчивость рудомещающих отложений Бакчарского железорудного проявления (Томская область)
Рудмин М.А.
- Эволюция сульфидного расплава в процессе образования Кингашского ультрамафитового массива (северо-запад Восточного Саяна)
Юричев А.Н.
- Генезис доюрских залежей нефти Рогожниковской группы месторождений по данным гравиразведки и геохимии (Тюменская область)
Лобова Г.А., Коржов Ю.В., Кудряшова Л.К.
- Картирование вертикальной геохимической зональности на примере золоторудного месторождения Чертово Кoryто (Патомское нагорье)
Гаврилов Р.Ю.
- Геолого-геофизические условия на золоторудных полях Сибири
Ерофеев Л.Я., Орехов А.Н.

ГЕОФИЗИКА

- Специализированный анализ керна для изучения анизотропии коллекторов нефти и газа
Коровин М.О.
- Палеоклимат Западной Сибири и реализация генерационного потенциала нефтематеринских отложений
Исаев В.И., Рылова Т.Б., Гумерова А.А.
- Развитие формализма метода частиц для моделирования отклика флюидонасыщенных пористых геологических материалов
Димаки А.В., Шилько Е.В., Астафуров С.В., Псахье С.Г.
- Решение прямой задачи геотермии для трехмерной неоднородной среды
Пятаков Ю.В.
- Реконструкции термической истории нефтематеринских тогурских отложений и оценка распределения плотности ресурсов пластов Ю₁₆ и Ю₁₅
Лобова Г.А., Власова А.В., Исаева О.С., Исаев В.И.

ГЕОХИМИЯ

- Родоначальный расплав и геодинамика расслоенных мафит-ультрамафитовых массивов Канской глыбы Восточного Саяна
Юричев А.Н., Чернышов А.И.

CONTENTS

MINERALOGY

- 5 Accessory titanomagnetite typomorphism of devonian granitoids in north-western area of Rudni Altai
Novoselov K.L., Turkin Yu.A.

GENERAL GEOLOGY

- 17 Endogenous and exogenous factors at sediment erosion, transporting and accumulation in the north-east shelf of Sakhalin island
Ilin V.V.

LITHOLOGY

- 23 Lithology and features of vendian deposits formation in the South-Eastern part of West-Siberian geosyncline
Koveshnikov A.E., Kontorovich V.A., Makarenko S.N., Tatyannin G.M., Terleev A.A., Tokarev D.A.
- 32 Geochemical and lithological justification of «the main source» concept of pre-Jurassic oil deposits in Krasnoleninsk arch (Tyumen region)
Kuzina M.Ya., Korzhov Yu.V., Isaev V.I.

GEOLOGY AND MINERALS

- 39 Prognosis-search complex for mesothermal gold deposits. P. 3. Petrochemical and geochemical criteria
Kucherenko I.V.
- 48 Facial features and magnetic susceptibility of ore-hosting sediments of Bakchar iron ore occurrence (Tomsk region)
Rudmin M.A.
- 56 Evolution of sulfide liquid at Kingashsky ultramafic massif formation (north-west of Eastern Sayan)
Yurichev A.N.
- 65 Genesis of pre-Jurassic oil deposits of Rogozhnikov group of fields by gravity exploration and geochemistry data (Tyumen region)
Lobova G.A., Korzhov Yu.V., Kudryashova L.K.,
- 73 Mapping of vertical geochemical zonation by the example of gold field Chertovo Koryto (the Patom upland)
Gavrilov R.Yu.
- 80 Geological and geophysical conditions at Siberian golden ore fields
Erofeev L.Ya., Orekhov A.N.

GEOPHYSICS

- 87 Special core analysis to study oil and gas reservoir anisotropy
Korovin M.O.
- 93 Paleoclimate of Western Siberia and implementation of generative potential of oil source deposits
Isaev V.I., Rylova T.B., Gumerova A.A.
- 102 Development of particle method formalism for numerical modeling of the response of fluid-saturated porous geological materials
Dimaki A.V., Shilko E.V., Astafurov S.V., Psakhie S.G.
- 112 Solution of geothermy direct problem for three-dimensional inhomogeneous medium
Pyatakov Yu.V.
- 119 Reconstruction of thermal history of petromaternal togur deposits and assessment of density distribution of J₁₅ and J₁₆ layers resources
Lobova G.A., Vlasova A.V., Isaeva O.S., Isaev V.I.

GEOCHEMISTRY

- 128 Parental melt and geodynamics of the layered mafic-ultramafic massifs of the Kan block of Eastern Sayan
Yurichev A.N., Chernyshov A.I.

Проблемы диагностики цеолитов и влияние их наличия на разработку продуктивных отложений Мессояхской группы месторождений Поднебешных А.В., Овчинников В.П.	137	The problems of zeolites detection and their influence on development of the productive reservoirs in the Messoyakha group of fields Podnebesnykh A.V., Ovchinnikov V.P.
Возраст и природа щелочных пород Дахунурского плутона, юго-восточная Тува Врублевский В.В., Никифоров А.В., Сугоракова А.М., Лыхин Д.А., Козулина Т.В., Юдин Д.С.	146	The age and origin of alkaline rocks of the Dakhunur pluton, South-Eastern Tuva Vrublevskii V.V., Nikiforov A.V., Sugorakova A.M., Lykhin D.A., Kozulina T.V., Yudin D.S.
ГИДРОГЕОЛОГИЯ		HYDROGEOLOGY
Гидрологические аспекты образования болот в таёжной зоне Западной Сибири Савичев О.Г., Паромов С.В.	154	Hydrological aspects of bogs formation in taiga zone of Western Siberia Savichev O.G., Paromov S.V.
ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ		TECHNOLOGY AND TECHNIQUE OF EXPLORATION WORK
Влияние координат установки устройств измерения давления в нефтепроводе на точность определения параметров утечки Мамонова Т.Е.	162	Influence of installation coordinates of pressure measurement devices in the oil pipeline on accuracy in determining leak parameters Mamonova T.E.
Проектирование геологоразведочных работ с учётом многофункционального использования скважин с целью снижения природной газоносности угольных пластов Шубина Е.А., Брылин В.И., Лукьянов В.Г.	167	Design of geological exploration considering multifunctional use of wells to reduce natural gas content of coal beds Shubina E.A., Brylin V.I., Lukyanov V.G.
Пористость и проницаемость облегчённых тампонажных растворов Пахарева А.В.	173	Porosity and permeability of lightweight cement mortars Pakhareva A.V.
НЕФТЕГАЗОДОБЫЧА		OIL AND GAS PRODUCTION
Адаптивная идентификация эволюционных процессов нефтегазодобычи на основе интегрированных систем феноменологических моделей Сергеев В.Л., Наймушин А.Г., Нгуен Куинь Хуи	177	The adaptive identification in evolutionary processes of oil and gas production based on integrated systems of phenomenological models Sergeev V.L., Naymushin A.G., Nguen Kuin Khui
ГЕОЭКОЛОГИЯ		GEOECOLOGY
Минеральный и геохимический состав твердого осадка в снеговом покрове г. Благовещенск (Амурская область) Юсупов Д.В., Степанов В.А., Трутнева Н.В., Могилёв А.А.	184	Mineral and geochemical composition of dust aerosols in snow cover of Blagoveschensk city (Amur region) Yusupov D.V., Stepanov V.A., Trutneva N.V., Mogilev A.A.
Особенности химического состава солевых отложений подземных питьевых вод Республики Алтай Робертус Ю.В., Рихванов Л.П., Соктоев Б.Р.	190	Features of chemical composition of salt deposits in underground drinking water of Altai Republic Robertus Yu.V., Rikhvanov L.P., Soktoev B.R.
Геоэкологический анализ степных ландшафтов в районах нефтегазодобычи (на примере Оренбургской области) Мячина К.В., Токарева О.С.	196	Geoecological analysis of steppe landscapes in oil and gas production fields (by the example of Orenburg region) Myachina K.V., Tokareva O.S.
Анализ тяжелых металлов донных отложений малых рек, подверженных влиянию сельскохозяйственной мелиорации, на территории Среднеамурской низменности Зубарев В.А.	203	Analysis of heavy metal in bottom deposits of small rivers effected by agricultural reclamation on Sredneamurskaya lowland Zubarev V.A.
Геохимическая характеристика солевых отложений питьевых вод Байкальского региона Соктоев Б.Р., Рихванов Л.П., Тайсаев Т.Т., Барановская Н.В.	209	Geochemical characteristics of drinking water salt deposits of Baikal region Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Taisaev T.T., Baranovskaya N.V.

Минералогия

УДК 549.731.13:549.02

ТИПОМОРФИЗМ АКЦЕССОРНОГО ТИТАНОМАГНЕТИТА ДЕВОНСКИХ ГРАНИТОИДОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ РУДНОГО АЛТАЯ

Новоселов Константин Леонидович,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и разведки
полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: nkonstantin1@rambler.ru.

Туркин Юрий Александрович,

канд. геол.-минерал. наук, ведущий геолог
Региональной партии ОАО «Горно-Алтайская экспедиция»,
Россия, 659420, Алтайский край, Бийский р-он,
с. Малоенисейское, ул. Советская, 15. E-mail: jurtour@yandex.ru.

Актуальность определяется необходимостью минералого-геохимических исследований потенциально рудоносных гранитоидных комплексов Рудного Алтая с целью расширения минерально-сырьевой базы России.

Цель работы – исследование закономерностей распределения в гранитоидах акцессорного титаномагнетита, особенностей химического состава, строения его зёрен, парагенетической ассоциации и выделение типоморфных признаков, определяющих условия формирования полифазного алейско-змеиногорского гранитоидного комплекса.

Методы исследования: определение химического состава минералов на микрозонде CAMEBAX-MICRO, на электронном сканирующем микроскопе JSM-6510LV (Jeol Ltd) с энерго-дисперсионным спектрометром INCAEnergy350+.

Результаты: впервые детально изучен акцессорный магнетит алейско-змеиногорских гранитоидов, выделено две его генерации – титаномагнетит раннемагматический и магнетит постмагматический. Первый представлен структурой распада-окисления магнетит-ульвошпинелевой системы. Преобладают сидерофильные элементы-примеси – Mn, V, Mg, Cr, Ge, в меньшей степени литофилы Al, Si, Y, отсутствуют халькофильные элементы. Установлен генезис постмагматического магнетита – результат выщелачивания титаномагнетита магматогенными гидротермальными растворами с последующей кристаллизацией магнетита, который наследует химизм титаномагнетита, отличаясь низким содержанием или отсутствием Ti и других элементов-примесей. Впервые отмечена особенность поведения V – в магнетитах заключительных лейкогранитных фаз содержания V на порядок выше, чем в раннемагматическом титаномагнетите.

Выводы: особенности структуры распада, элементы-примеси титаномагнетита служат типоморфным признаком базальтоидной природы гранитоидов. Калиевая специфика щёлочности, повышенная кремнекислотность, активность летучих на заключительном этапе препятствовали накоплению V в титаномагнетите. Раннемагматический титаномагнетит – минерал-концентратор V, что отражает сингенетическую обогащённость расплава этим элементом и геохимическую специализацию алейско-змеиногорских гранитоидов на Fe, Ti, V, а также Y и PЗЭ.

Ключевые слова:

Рудный Алтай, гранитоиды, титаномагнетит, изоморфная система, структура распада, типоморфизм.

Постановка задачи

В пределах российской северо-западной части Рудного Алтая широко развиты гранитоидные тела, сосредоточенные в структурах Алейского поднятия между девонскими вулканогенными прогибами. Северную часть антиклинория занимает крупный, площадью более 1000 кв. км, Новонико-

лаевский плутон, имеющий сложную форму, удлиненную более чем на 60 км в субширотном направлении вдоль крупного Варшавского разлома. Южнее и на юго-западе его сменяют несколько меньшие по площади (около 300 км²) соответственно Алейский и Устьянский массивы. Названные три массива и ряд более мелких гранитоидных тел гео-

лого-съемочными работами, проведенными в последнее десятилетие ОАО «Горно-Алтайская экспедиция», объединены в полифазный и полиформационный алейско-змеиногорский магматический комплекс средне-верхнедевонского возраста [1–3]. В качестве петротипа комплекса принят полифазный Новониколаевский интрузив. Алейский и Устьянский массивы, ранее выделявшиеся в ранге одноимённых самостоятельных комплексов, представляются как единые с Новониколаевским индивидуализированные части крупного plutона батолитового типа, сформированного из одного магматического центра активизированной континентальной окраины в средне-позднедевонское время. По составу и геологическому положению комплекс рассматривается как типовое проявление тоналит-плагиогранит-лейкогранитовой формации окраинно-континентальных вулканоплутонических поясов, объединяющей черты тоналит-плагиогранит-гранодиоритовой и лейкогранитовой формаций [3].

Основная задача авторов – исследование закономерностей распределения широко распространенного в гранитоидных массивах комплекса акцессорного титаномагнетита, особенностей химического состава и строения его зёрен, парагенетической ассоциации в гранитоидах различных фаз – производных длительно эволюционировавшего магматического расплава, с целью выявления дополнительных типоморфных признаков, позволяющих идентифицировать физико-химические условия формирования полифазного алейско-змеиногорского гранитоидного комплекса.

Петролого-геохимические особенности гранитоидов алейско-змеиногорского комплекса

Алейско-змеиногорский комплекс, петротипом которого является Новониколаевский гранитоидный pluton, включает породы четырёх интрузивных фаз (в порядке становления): 1 – габброиды и диоритоиды; 2 – тоналиты, кварцевые диориты, роговообманково-биотитовые плагиограниты; 3 – биотит-мусковит-роговообманковые лейкоплагиограниты; 4 – биотит-мусковитовые лейкограниты. Для пород комплекса не характерны гранодиориты и граниты. Наибольшую площадь plutона занимают гранитоиды второй, главной, фазы внедрения и лейкограниты заключительной. Типичные породы Алейского массива, сливающегося с Новониколаевским в центральной части Алейского поднятия, представлены тоналитами и плагиогранитами. Дифференциаты заключительной фазы внедрения слагают крупные штоки, в том числе Устьянский массив, занимающий юго-западную часть Новониколаевского plutона, и по своему петрографическому составу породы достаточно однородные с преимущественным распространением биотитовых и биотит-мусковитовых лейкогранитов.

Вычисленные температура кристаллизации пород по формуле Г.М. Беляева и В.А. Рудника [4], температура кристаллизации титаномагнетита и

фугитивность кислорода по методу А.Ф. Баддингтона и Д.Х. Линдслея [5, 6] приведены в табл. 1. Как следует из полученных значений, формирование гранитоидных массивов комплекса относится к достаточно высокотемпературным (750...900 °C), температура кристаллизации акцессорного титаномагнетита также находится в пределах 700...800 °C при значениях фугитивности кислорода $10^{-17,5} \dots 10^{-13,5}$ атм.

Характерная особенность формирования пород комплекса – широко проявившийся в постмагматическую стадию щелочной аутометасоматоз с возрастающим трендом щёлочности от дифференциатов ранних фаз к заключительным. По ряду геологических признаков устанавливается принадлежность гранитоидных тел рассматриваемого комплекса гипабиссальной фации глубинности [1–3].

Таблица 1. Температуры (Т, °C) и фугитивность кислорода (f_{O_2}) формирования пород и титаномагнетита

Фаза	Порода (массив)	Т, °C		f_{O_2} , 10 ⁻ⁿ атм.
		порода	титаномагнетит	
2	Плагиогранит (Новониколаевский)	800	700	17,5
	Тоналит (Алейский)	800	800	13,8
3	Лейкоплагиогранит (Новониколаевский)	800	800	13,5
	Плагиогранит (Алейский)	750	700	17,5
4	Лейкогранит (Новониколаевский)	900	700	17,5
	Лейкогранит (Алейский)	850	700	17,5
	Лейкогранит (Устьянский)	900	750	14,0

Породы главной фазы отличаются повышенной натриевостью и соответственно преобладанием плагиоклаза над калиевым полевым шпатом. В породах последующих дифференциатов возрастает активность калия, и микроклин по отношению к плагиоклазу становится доминирующим в составе лейкогранитов, образует пертитовые вроски в олигоклазе и порфирировидные вкрапленники. Показатели щёлочности пород (коэффициент агаитности K_a , простой щёлочности $K_{щп}$) закономерно возрастают от пород главной фазы ($K_a=0,38 \dots 0,67$; $K_{щп}=1,39 \dots 2,40$) к заключительным ($K_a=0,87 \dots 0,90$; $K_{щп}=4,80 \dots 5,80$).

Ведущая ассоциация акцессорных минералов в гранитоидах главной и третьей фазы – титаномагнетит-ильменит-циркон-апатитовая, в лейкогранитах заключительной фазы сменяется на гематит-титаномагнетит-мартитизированный-циркон-топаз-редкоземельную с Y, Ce, La.

Методика исследований

Методика отбора минералогических проб гранитоидов и последующая их обработка принята в соответствии с существующими рекомендациями

В.В. Ляховича [7], отличаясь весом исходного материала, который составлял 3...5 кг. Минералогические пробы габброидов и других разновидностей пород ранней первой фазы не изучались в виду их интенсивной проработки поздними метаморфическими и гидротермальными процессами. Все аналитические исследования выполнены в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Определение химического состава титаномагнетита проведено на микрозонде CAMEBAX-MICRO канд. хим. наук Л.Н. Поспеловой. Исследование строения зёрен титаномагнетита, закономерностей изменения химического состава по профилю отдельных его кристаллов проведено на электронном сканирующем микроскопе JSM-6510LV (Jeol Ltd) с энерго-дисперсионным спектрометром INCAEnergy 350+. Детально анализировался химический состав фаз структуры распада твёрдого раствора титаномагнетита, имеющиеся включения более ранних минералов, а также сингенетичных минералов, образующих с титаномагнетитом сростания. В работе использованы анализы не менее 85 зёрен титаномагнетита из пород различных гранитоидных фаз. Кроме титаномагнетита анализировались наиболее распространённые сопутствующие ему другие железо-титанистые оксиды – гематит, ильменит, рутил. Анализы выполнены мл. науч. сотр. М.В. Хлестовым при участии соавтора статьи К.Л. Новоселова

Результаты исследований и их обсуждение

Титаномагнетит относится к числу наиболее распространенных акцессорных минералов в гранитоидах рассматриваемого комплекса, характеризуется неравномерностью распределения по площади массива, как в породах главной фазы, так и в последующих дифференциатах, образуя варьирующие в широких пределах весовые количества. Наиболее высокие содержания его в тоналитах Алейского массива (более 5 кг/т) и в плагiogранитах главной фазы Новониколаевского с разбросом содержаний по площади массива от 650 г/т до 2 кг/т. В плагiogранитах и лейкоплагiogранитах последующих фаз внедрения концентрации титаномагнетита снижаются до 1...1,5 кг/т и наиболее низкие – в лейкократовых разновидностях пород заключительных инъекций (400...900 г/т).

Электронно-микроскопическими исследованиями выявлено две генерации магнетита, различающиеся строением зёрен, химическим составом, временем появления и парагенетической ассоциацией: 1) титаномагнетит раннемагматический, 2) магнетит постмагматический.

Титаномагнетит раннемагматический характеризуется гетерогенностью строения зёрен, проявляющейся во всех фазовых разновидностях гранитоидов комплекса, и обусловленной следующими факторами: включением раннемагматических минеральных фаз; структурой распада твёрдого раствора титаномагнетита; метасоматическими изменениями в постмагматическую стадию щелочного автометасоматоза.

Среди включений в рассматриваемом титаномагнетите наиболее обычны кристаллы фторопатита (содержание F до 3,5 %), реже встречается циркон, как правило, концентрирующийся по периферии его зёрен, и часто содержит включения микрокристаллитов титаномагнетита. Тесная ассоциация с апатитом, цирконом свидетельствует о сингенетичности выделения титаномагнетита из расплава с раннемагматическими акцессориями в условиях высоких температур. Парагенетическая ассоциация титаномагнетита с оксидными раннемагматическими акцессориями – гематитом, рутилом, ильменитом – указывает на высокий кислородный потенциал кристаллизующегося расплава и обогащённость его Fe и Ti. Темноцветные породообразующие (высокотитанистая роговая обманка) выделяются позже титаномагнетита, слагают каймы вокруг его зёрен, выполняют в них трещинки. Выделение водосодержащих фемических породообразующих минералов в более позднюю магматическую стадию кристаллизации указывает на маловодность или «сухость» магматического расплава на ранних этапах его кристаллизации. О дефиците воды в магматическом расплаве свидетельствует также акцессорный раннемагматический титансодержащий гранат уграндитового ряда, единичные кристаллы которого часто фиксируются в тоналитах главной фазы, и по данным [8] служит показателем «сухости» расплава.

Титаномагнетит представляет собой промежуточный член двухкомпонентного твёрдого раствора ульвошпинели и магнетита $[x\text{Fe}_2\text{TiO}_4 \cdot (1-x)\text{Fe}_3\text{O}_4]$, выделенного Д.М. Печерским, В.И. Багиным и др. [9] в титаномагнетитовую серию со шпинелевой структурой. На раннемагматической стадии в условиях высоких температуры и парциального давления кислорода имело место высокотемпературное окисление однородной титаномагнетитовой фазы с формированием структуры распада твёрдого раствора – обособление собственно титаномагнетитовой матрицы и железо-титанистых по составу фаз. Однако в породах различных дифференциатов рассматриваемого комплекса структура распада титаномагнетита несколько индивидуализируется своими особенностями строения и химизма.

Титаномагнетит плагiogранитов главной фазы Новониколаевского массива характеризуется субграфической структурой распада ильменита в форме тонких изогнутых пластинок, пятен размером до 8 μm , заметно уменьшающихся к периферии зерна (рис. 1). По составу выделения ильменита весьма близки к стехиометрии – $(\text{Fe}_{0,972}\text{Mn}_{0,102})_{1,074}\text{Ti}_{0,962}\text{O}_3$. Несколько иная структура распада в тоналитах Алейского массива, она представлена параллельно ориентированными в одном направлении вытянутыми ламелями, размером до 20×6 μm , с извилистыми, редко прямолинейными границами. В периферической части зерна рисунок структуры сменяется на тонкие прерывисто-шнуровидные обособления (рис. 2). Химический состав варьирует даже в пределах одной пластинки от ильменита до

рутила и ферритрутила с широким разбросом содержаний Fe (7,5...24,3 %).

Структура распада титаномагнетита лейкоплагиогранитов Новониколаевского массива последующей 3-й фазы внедрения сформирована ферритрутилом с варьирующими содержаниями Ti (74,3...89,2 %) и Fe (7,0...19,6 %) и представлена параллельно удлинёнными тонкими ламелями, переходящими к краю матрицы в субмикроскопические и обильные обособления, занимающие около 90 % её площади (рис. 3). В лейкогранитах четвёртой, заключительной фазы Новониколаевского массива структура распада титаномагнетита имеет вид прерывистых и ориентированных по (111) пластинок ильменита переменного состава от ильменита, близкого к стехиометрии $(\text{Fe}_{1,092}\text{Mn}_{0,082})_{1,174}\text{Ti}_{0,913}\text{O}_3$ до ильменита с избытком Fe – гемойльменита $(\text{Fe}_{1,675}\text{Mn}_{0,046})_{1,721}\text{Ti}_{0,631}\text{O}_3$.

Таким образом, разброс содержаний Fe и Ti, часто в пределах одной ламели, – общая особенность химического состава выделившихся фаз. Вариации степени окисленности титаномагнетита по данным [9] является характерным признаком его высокотемпературного окисления в условиях высокого парциального давления кислорода.

Картина раннемагматического окисления титаномагнетита осложняется проявившимся в постмагматическую стадию щелочным, существенно калиевой направленности, аутометасоматозом, который способствовал процессу мартитизации зёрен рассматриваемого минерала. В меньшей степени мартитизации подвергся титаномагнетит пород главной и третьей фаз Новониколаевского массива, в которых замещение титаномагнетита, как правило, начинается от периферии зерна в виде тонких гематитовых иголочек, ориентированных по (111), к его центру (рис. 4). В интенсивно калишпатизированных гранитоидах и породах заключительных фаз внедрения зёрна титаномагнетита часто нацело замещены гематитом с сохранившимися реликтами пластинок структур распада твёрдого раствора (рис. 5). Нередко мартитизация сопровождается формированием текстур «разъедания» (рис. 6) и выщелачиванием титаномагнетита с образованием ильменитовых сеток (рис. 7). Процесс «разъедания» начинается от края зерна, проникая по границам ламелей ильменита к внутренним участкам зерна титаномагнетита. П. Рамдор [10] подобное избирательное выщелачивание магнетита объясняет интенсивным окислением и воздействием на минерал гидротермальных растворов.

В лейкогранитах Устьянского массива широким распространением пользуются зёрна титаномагнетита, продукты окисления которого представлены гидрогематитом и гидрогетитом, нередко содержащими зёрна каолинита (рис. 8), и их совместное появление обязано экзогенному процессу.

В химическом составе титаномагнетитовой фазы структуры распада магнетит-ульвошпинелевого твёрдого раствора установлен довольно ограниченный набор элементов-примесей, преимуще-

ственно группы железа (Mn, V, Mg, Cr, Ge), элементы литофильной группы (Al, Si и Y) и полное отсутствие халькофильных (табл. 2). Элементы-сидерофилы, обладая кристаллохимическим сродством к Fe^{2+} и Fe^{3+} , образуют структурную примесь в титаномагнетите по схеме изовалентного или гетеровалентного изоморфизма [11–13].

Кристаллохимические формулы титаномагнетита, представленные средними значениями коэффициентов, и его минальный состав приведены в табл. 2, 3. Состав титаномагнетита характеризуется резким дефицитом катионов Fe^{2+} и близким к стехиометрии количеством катионов в позиции Fe^{3+} , что объясняется высокой степенью окисленности железа, контролируемой режимом кислорода.

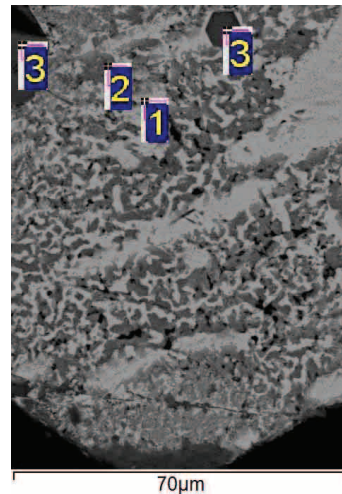


Рис. 1. Титаномагнетит (1) с субграфической структурой распада твёрдого раствора: 2 – ильменит; 3 – апатит. Плагиогранит, главная фаза, Новониколаевский массив. Здесь и на последующих рисунках – изображение в обратно рассеянных электронах

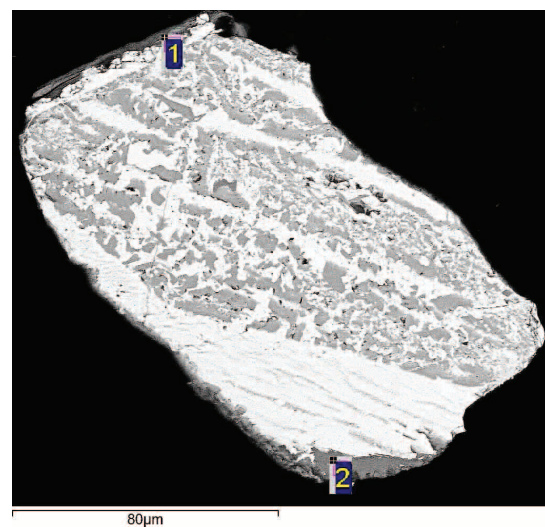


Рис. 2. Титаномагнетит (белое) с параллельно ориентированной структурой распада твёрдого раствора: темно-серое – ферритрутил; 1 – высокотитанистый амфибол; 2 – титанистый гранат. Тоналит, Алейский массив



Рис. 3. Структура распада твёрдого раствора титаномагнетита (2): 1 – феррирутил; 3, 4 – апатит; 5 – альбит. Лейкоплагиогранит, 3-я фаза, Новониколаевский массив



Рис. 6. Мартитизированный кристалл титаномагнетита с текстурой избирательного выщелачивания. Калишпатизированный плагиогранит-порфир, главная фаза, Алейский массив

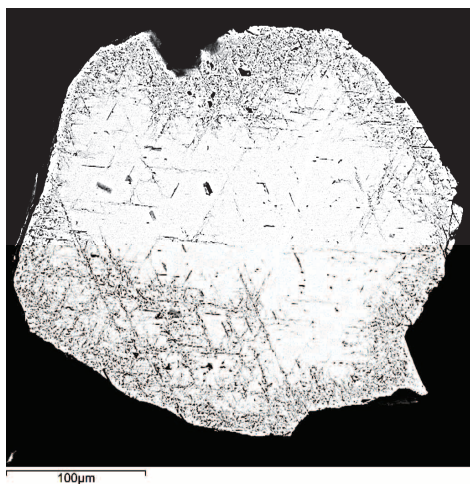


Рис. 4. Мартитизация титаномагнетита. Игольчатые агрегаты гематита развиваются по направлениям (111) титаномагнетита. Лейкогранит, 4-я фаза, Новониколаевский массив

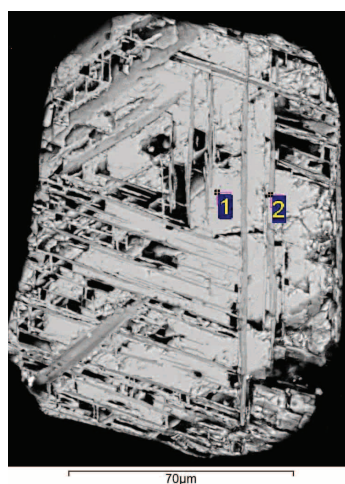


Рис. 7. Выщелачивание титаномагнетита (1) с формированием ильменитовой сетки (2). Лейкогранит, 4-я фаза, Новониколаевский массив



Рис. 5. Структура распада титаномагнетита: 1 – пластинки гемоильменита; 2 – включения фторапатита; 3 – биотит. Лейкогранит, 4-я фаза, Новониколаевский массив

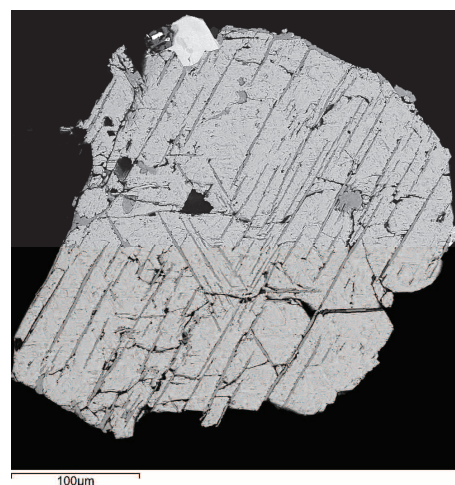


Рис. 8. Гидрогематит, заместивший титаномагнетит; просматривается структура распада ламелей гемоильменита, феррирутила по (111) титаномагнетита; по краю зерна сверху слева – включения циркона, монацита, апатита. Лейкогранит, 4-я фаза, Устьянский массив

Характерной особенностью химического состава титаномагнетита является разброс содержаний как главных минералообразующих элементов (Fe, Ti), так и примесных, особенно Mn, V, Cr. Вариации концентраций Fe и Ti нередко проявляются даже в пределах одного анализируемого зерна титаномагнетита. Величины отношений ульвошпинелевого и магнетитового миналов в титаномагнетите гранитоидов последовательных дифференциатов находятся в пределах 1:3...1:6 и регулируются режимом кислорода и, соответственно, степенью окисленности-распада магнетит-ульвошпинелевого твёрдого раствора. Однако не исключается и различный уровень насыщенности титаном магматического расплава. Так, на фоне довольно выдержанных средних содержаний Ti в титаномагнетите пород различных фаз (10...11 %), контрастно высокими концентрациями этого элемента выделяются титаномагнетиты тоналитов главной фазы Алейского массива и лейкоплагиограниты 3-й фазы Новониколаевского (средние содержания Ti соответственно 18,09 и 15,78 %). Минералого-петрографическими и электронно-микроскопическими исследованиями в алейских тоналитах в парагенетической ассоциации с титаномагнетитом установлены высокотитанистые амфибол, гранат (рис. 2), а также раннемагматические феррирутил, ильменит. Заметно пониженные содержания Ti в титаномагнетите плагиогранитной главной фазы Новониколаевского массива, видимо, отражают в целом обеднённость плагиогранитного дифференциата этим элементом, значительная часть которого вошла в отдифференцированный габброидный расплав первой фазы внедрения. Имеющийся Ti в плагиогранитном расплаве на раннемагматиче-

ской стадии кристаллизации перераспределялся между сосуществующим с ним ильменитом. В лейкоплагиогранитном расплаве последующей третьей фазы внедрения имело место накопление Ti, что нашло отражение не только в резко возросшем количестве ульвошпинелевого минала в титаномагнетите, но и в повышенном содержании в лейкогранитах акцессорного ильменита.

Марганец в форме якобитового минала присутствует в титаномагнетите рассматриваемых гранитоидов постоянно, и в его распределении проявляется прямая связь с ульвошпинелевым миналом, особенно заметная в породах главной фазы и последующей лейкоплагиогранитной – марганцовистость титаномагнетита возрастает с ростом его титанистости (табл. 2, 3). Существование тесной геохимической связи между Ti и Mn в титаномагнетите отмечается рядом исследователей [14]. Однако в титаномагнетите заключительной лейкогранитной фазы Алейского и Устьянского массивов между содержаниями ульвошпинелевого и якобитового миналов проявляется обратное соотношение – с возрастанием в титаномагнетите ульвошпинелевого компонента (18,07...19,16 мол. %) резко понижается количество якобитового (до 0,2 мол. %) (табл. 3). Обеднённость Mn титаномагнетита плагиогранитов главной фазы Новониколаевского плутона и лейкогранитной заключительной фазы Устьянского массива (табл. 2) связано с перераспределением Mn в сосуществующих раннемагматических минералах. По данным электронно-микроскопических исследований кристаллы апатита, образующие включения в титаномагнетите, содержат Mn до 0,65 %, в ильмените концентрации Mn достигают 10 %, а в устьянских лейкогранитах, кроме ильменита, Mn в количестве

Таблица 2. Химический состав акцессорного титаномагнетита гранитоидов алейско-змеиногорского комплекса (мас. %)

Фаза	Порода (массив)	n	FeO _{общ}	TiO ₂	MnO	V ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃	GeO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Y ₂ O ₃
2	Плагиогранит (Новониколаевский)	7	81,79...82,64 82,76	9,01...11,0 10,01	0,03...0,11 0,06	0,30...0,49 0,39	0,01...0,02 0,01	0,01...0,04 0,02	0,02...0,09 0,03	–	–	0,02...0,03 0,02
	Тоналит (Алейский)	5	71,50...78,53 75,29	13,98...20,70 18,09	0,53...1,61 1,05	0,01...0,59 0,22	0,001...0,004 0,002	0,05...0,23 0,15	–	–	–	0,01...0,02 0,02
3	Лейкоплагиогранит (Новониколаевский)	6	73,57...76,75 74,78	14,66...17,81 15,78	1,07...1,42 1,24	0,46...0,66 0,54	0,003...0,005 0,004	–	–	–	–	0,02...0,03 0,02
	Плагиогранит (Алейский)	5	83,83...84,87 84,51	8,05...17,81 10,51	0,06...0,2 0,07	0,20...0,27 0,23	0,004...0,03 0,01	–	0,001...0,03 0,02	–	–	0,004...0,0 ≥ 0,007
4	Лейкогранит (Новониколаевский)	6	73,41...87,91 80,1	5,82...14,85 10,34	0,05...0,5 0,07	0,07...0,08 0,076	0,01...0,021 0,013	–	0,01...0,08 0,05	–	–	0,02...0,02 4,0,02
	Лейкогранит (Алейский)	5	81,74...85,9 83,2	7,04...12,05 9,55	0,09...0,7 0,068	0,05...0,31 0,18	0,001...0,02 0,01	0,01...0,02 0,01	0,02...0,04 0,03	–	–	0,01...0,04 0,02
	Лейкогранит (Устьянский)	6	69,82...88,74 81,49	8,67...13,52 10,9	0,09...0,1 0,1	–	0,018...0,023 0,02	0,01...0,012 0,01	0,01...0,02 0,02	0,49...0,62 0,56	0,24...0,47 0,36	–

Примечание: n – число анализов; «–» – элемент не установлен; над чертой – минимальное – максимальное содержание элемента, под чертой – среднее.

Кристаллохимические формулы:

2-я фаза Плагиогранит (Новониколаевский) $(\text{Fe}_{0,847}\text{Mn}_{0,002}\text{Mg}_{0,001})_{0,85}(\text{Fe}_{1,708}\text{Ti}_{0,29}\text{V}_{0,0065}\text{Cr}_{0,0009}\text{Ge}_{0,0008})_{2,006}\text{O}_4$

Тоналит (Алейский) $(\text{Fe}_{0,732}\text{Mn}_{0,033}\text{Mg}_{0,0002})_{0,765}(\text{Fe}_{1,477}\text{Ti}_{0,505}\text{V}_{0,009}\text{Cr}_{0,004}\text{Ge}_{1,995})_{2,004}\text{O}_4$

3-я фаза Лейкоплагиогранит (Новониколаевский) $(\text{Fe}_{0,824}\text{Mn}_{0,017}\text{Mg}_{0,0008})_{0,842}(\text{Fe}_{1,66}\text{Ti}_{0,332}\text{V}_{0,013})_{2,005}\text{O}_4$

Плагиогранит (Алейский) $(\text{Fe}_{0,862}\text{Mn}_{0,003}\text{Mg}_{0,001})_{0,866}(\text{Fe}_{1,734}\text{Ti}_{0,268}\text{V}_{0,009}\text{Ge}_{0,0004})_{2,011}\text{O}_4$

4-я фаза Лейкогранит (Новониколаевский) $(\text{Fe}_{0,874}\text{Mn}_{0,007}\text{Mg}_{0,001})_{0,895}(\text{Fe}_{1,761}\text{Ti}_{0,201}\text{V}_{0,001}\text{Ge}_{1,964})_{2,004}\text{O}_4$

Лейкогранит (Алейский) $(\text{Fe}_{0,813}\text{Mn}_{0,002}\text{Mg}_{0,0008})_{0,816}(\text{Fe}_{1,64}\text{Ti}_{0,36}\text{V}_{0,002}\text{Ge}_{0,0007})_{2,003}\text{O}_4$

Лейкогранит (Устьянский) $(\text{Fe}_{0,898}\text{Mn}_{0,003}\text{Mg}_{0,001})_{0,902}(\text{Fe}_{1,81}\text{Ti}_{0,115}\text{Al}_{0,06}\text{Cr}_{0,003}\text{Ge}_{0,0003})_{1,989}\text{O}_4$

до 0,5 % накапливается в породообразующих биотите, мусковите, а также в акцессорном диопсиде.

Ванадий в переменных количествах присутствует в титаномagnetите всех фазовых разновидностей пород за исключением лейкогранитов Устьянского массива, в титаномagnetите которых этот элемент не накапливается (табл. 2, 3). Наиболее обогащён V титаномagnetит главной плагиогранитной и последующей лейкоплагиогранитной фаз Новониколаевского плутона, в котором при незначительном разбросе частных содержаний средние содержания этого элемента составляют 0,39...0,54 %. Вариацией содержаний V выделяется титаномagnetит тоналитов Алейского массива (0,01...0,59 %). Титаномagnetит лейкогранитов заключительных фаз, особенно Новониколаевского массива, накапливает этот элемент в заметно меньших количествах (0,07...0,08 %). Закономерности распределения V в титаномagnetите пород последовательных фаз наиболее контрастно подчёркиваются средними величинами кульсонитового ми-

нала (табл. 3). Поведение V^{3+} в титаномagnetите определяется его тесной кристаллохимической связью с Fe^{3+} , регулируемой режимом кислорода и кислотностью – щёлочностью расплава [15]. Так, высокими показателями фугитивности кислорода ($f_{O_2}=10^{-13,8}...10^{-13,5}$ атм.) характеризуются наиболее насыщенные ванадием титаномagnetиты алейских тоналитов главной фазы и лейкоплагиогранитов 3-й фазы Новониколаевского. Существенно окислительные условия, соответственно обогащённость расплава Fe^{3+} , служили благоприятным фактором для заполнения V^{3+} вакансии не только в структуре титаномagnetита, но и следуя за Fe^{3+} , в раннемагматическом гематите (до 0,47 %). В заключительных лейкогранитных фазах Алейского и Новониколаевского массивов резкое понижение ванадиевости титаномagnetита связано с изменением физико-химических условий кристаллизации расплава – относительное понижение кислородного потенциала ($f_{O_2}=10^{-17,5}$ атм.), возрастание щёлочности и активности летучих, особенно F, с

Таблица 3. Минимальный состав титаномagnetита (мол. %)

Фаза	Порода (массив)	Магнетит $FeFe_2O_4$	Ульвошпигель Fe_2TiO_4	Якобсит $MnFe_2O_4$	Кульсонит FeV_2O_4	Магнезиоферрит $MgFe_2O_4$	Хромит $FeCr_2O_4$	Герцинит $FeAl_2O_4$
2	Плагиогранит (Новониколаевский)	84,49	14,91	0,2	0,3	0,07	0,04	–
	Тоналит (Алейский)	70,11	21,63	7,62	0,47	0,02	0,15	–
3	Лейкоплагиогранит (Новониколаевский)	72,97	22,32	3,98	0,66	0,07	–	–
	Плагиогранит (Алейский)	85,26	13,36	0,88	0,45	0,06	–	–
4	Лейкогранит (Новониколаевский)	83,86	15,07	0,98	0,05	0,04	–	–
	Лейкогранит (Алейский)	81,54	18,07	0,2	0,1	0,08	0,02	–
	Лейкогранит (Устьянский)	77,91	19,16	0,2	–	0,1	0,02	2,93

Таблица 4. Химический состав акцессорного магнетита гранитоидов алейско-змеиногорского комплекса (мас. %)

Фаза	Порода (массив)	n	$FeO_{общ.}$	TiO_2	V_2O_3	MnO	Cr_2O_3	SiO_2	Al_2O_3
2	Плагиогранит (Новониколаевский)	6	<u>87,95...89,8</u> 3 89,53	<u>0,82...0,92</u> 0,87	–	–	–	–	–
	Тоналит (Алейский)	9	<u>92,72...93,91</u> 93,31	–	<u>0,22...0,28</u> 0,25	<u>0,32...0,45</u> 0,39	–	–	–
4	Лейкогранит (Новониколаевский)	10	<u>87,71...96,14</u> 92,07	<u>0,85...0,93</u> 0,89	<u>0,19...0,31</u> 0,23	–	<u>0,005...0,2</u> 0,10	–	<u>0,38...1,34</u> 0,95
	Лейкогранит (Алейский)	6	<u>90,6...93,63</u> 92,41	–	<u>0,19...0,31</u> 0,23	–	–	–	–
	Лейкогранит (Устьянский)	12	<u>86,53...93,19</u> 89,80	<u>0,22...1,01</u> 0,54	–	–	–	<u>0,24...1,56</u> 0,66	<u>0,28...0,49</u> 0,35

Примечание: n – число анализов; «–» – элемент не установлен; над чертой – минимальное – максимальное содержание компонента, под чертой – среднее.

Кристаллохимические формулы:

2-я фаза Плагиогранит (Новониколаевский) $Fe_{0,969}(Fe_{1,952}Ti_{0,028})_{1,98}O_4$

Тоналит (Алейский) $(Fe_{0,985}Mn_{0,014})_{0,999}(Fe_{1,998}V_{0,003})_{2,001}O_4$

4-я фаза Лейкогранит (Новониколаевский) $Fe_{0,938}(Fe_{1,89}Al_{0,018}Cr_{0,002}V_{0,001}Ti_{0,025})_{1,936}O_4$

Лейкогранит (Алейский) $Fe_{0,993}(Fe_{2,001}V_{0,003})_{2,004}O_4$

Лейкогранит (Устьянский) $Fe_{0,94}(Fe_{1,912}Al_{0,064}Ti_{0,026})_{2,002}O_4$

которым V в форме комплексного соединения $[VF_6]$ [15] способен мигрировать в остаточный расплав, что препятствует полному рассеянию V в раннемагматическом титаномагнетите. Отсутствие примеси V в титаномагнетите Устьянского массива и в целом низкие его содержания в лейкогранитах (20-кратное понижение относительно кларка) объясняется генетической принадлежностью его к типичным представителям гранитоидов А-типа [1]. Щелочная специализация лейкогранитного расплава, насыщенность его летучими служили неблагоприятными факторами для накопления V в титаномагнетите и других железосодержащих акцессорных и породообразующих минералах.

Примесь Mg в титаномагнетите гранитоидов рассматриваемых фаз присутствует постоянно и обычно его средние содержания составляют 0,01...0,02 %, за исключением алейских тоналитов главной фазы и лейкоплагиогранитов 3-й фазы Новониколаевского массива, в титаномагнетите которых количество Mg на порядок ниже (0,002...0,004 %). Хром накапливается в титаномагнетите пород главной фазы и преимущественно в тоналитах Алейского массива (0,05...0,23 %), в дифференциатах последующей 3-й фазы этот минерал не содержит Cr, однако проявляет тенденцию к его накоплению (до 0,02 %) в заключительной лейкогранитной фазе Алейского и Устьянского массивов. Германий относится к числу постоянно присутствующих примесей в титаномагнетите, за исключением алейских тоналитов и лейкоплагиогранитов Новониколаевского массива, титаномагнетит которых не содержит Ge (табл. 2). Однако в титаномагнетите следующей плагиогранитной фазы Алейского массива примесь Ge вновь появляется и вместе с Cr накапливается в титаномагнетите заключительных дифференциатов.

Присутствие литофильных глинозёма и кремнезёма установлено лишь в титаномагнетите лейкогранитов Устьянского массива (табл. 2). Способность Al_2O_3 растворяться в магнетите при высоких температурах (500...800 °C) доказана экспериментально [16]. Исследованиями В.А. Вахрушева [13] также отмечается возможность вхождения герцинита в структуру магнетита, однако при более высоких температуре и парциальном давлении кислорода. Накоплению герцининового минерала (до 2,93 мол. %) в структуре титаномагнетита Устьянского массива способствовали благоприятные физико-химические условия формирования лейкогранитной интрузии: 1) обогащённость расплава флюидом, содержащим F, Cl, P и другие летучие компоненты, обусловившим повышение температуры расплава (до 900 °C) и фугитивности кислорода ($f_{O_2}=10^{-14}$ атм.); 2) повышенная щелочность расплава и соответственно возросшая подвижность Al_2O_3 . В несколько меньших количествах в титаномагнетите содержится SiO_2 (0,24...0,47 %) и нахождение Si^{4+} обязано тесной кристаллохимической связи с Al^{3+} , следуя за которым, кремний формирует в минерале неструктурную примесь.

Иттрий, типично рассеянный элемент, тесно связанный с лантаноидами, образует стабильную примесь (0,01...0,04 %) в титаномагнетите гранитоидов Алейского и Новониколаевского массивов и отсутствует в этом минерале Устьянских лейкогранитов (табл. 2). Насыщенность лейкогранитного расплава летучими компонентами способствовала формированию в лейкогранитах Устьянского массива самостоятельных минеральных фаз – ксенотима, иттрофлюорита, монацита и других Y-содержащих редкоземельных акцессорных минералов, широко распространённых в породах Устьянского массива.

Таким образом, в составе раннемагматического титаномагнетита гранитоидного комплекса присутствуют элементы сидерофильной группы, что указывает на их генетическую принадлежность к дифференциатам базальтоидного первичного расплава, формирование которого обязано поступлению в область его генерации разогретых окислительных мантийных флюидов. Высокая активность кислорода поступающих флюидов, соответственно низкая подвижность серы, не способствовали накоплению халькофильных элементов в формирующемся базальтовом магматическом расплаве.

Накопление элементов-примесей в раннемагматическом титаномагнетите регулируется многими факторами, и прежде всего уровнем концентрации их в отдифференцированном гранитоидном расплаве, что хорошо прослеживается на распределении Cr, Ge, Mg в титаномагнетите гранитоидов различных фаз. Однако, как показывают исследования, к главным регуляторам накопления примесей относятся потенциал щёлочности расплава и активность летучих, особенно соединений F, зависимость от которых наглядно демонстрируется поведением V, Ti, Mn. Названные три элемента преимущественно накапливаются в титаномагнетите тоналитов и плагиогранитов с натриевой направленностью щёлочности ($Na_2O/K_2O=1,46...2,77$). По мере возрастания калиевоности в заключительных дифференциатах заметно снижается ванадиевость, титанистость и марганцовистость минерала. Повышенный потенциал калия в лейкогранитах Устьянского массива ($K_2O/Na_2O=1,24...1,46$) не способствовал концентрации V уже в области генерации остаточного лейкогранитного расплава.

Постоянное присутствие в рассеянной форме Y в титаномагнетите Алейского и Новониколаевского массивов, а в устьянских лейкогранитах в форме самостоятельных минералов Y и Y-содержащих редкоземельных минералов, видимо, является специфической особенностью химизма гранитоидных массивов и свидетельствует о повышенном потенциале Y и других лантаноидов в магматическом расплаве.

Магнетит по времени образования относится к заключительной постмагматической стадии формирования гранитоидных тел с участием магматогенных высокотемпературных (300...400 °C) гидро-

термальных растворов. Циркулирующие гидротермы производили выщелачивание раннемагматического титаномагнетита (рис. 7) с последующим формированием и отложением магнетита в остывающем гранитоидном теле. Наиболее активно гидротермальная деятельность проявилась в плагиогранит-тоналитовых интрузивах главной фазы и лейкогранитовых телах заключительных дифференциатов; в лейкоплагиогранитах третьей фазы постмагматический магнетит не установлен. В прозрачных шлифах новообразованный, по сути метасоматический, магнетит наблюдается в виде вытянутых цепочковидных агрегатов зёрен, выполняющих трещинки в породе, и нередко сопровождается хлоритом. В магнитной фракции минерал присутствует в обычных для него кристаллогранных формах {111} размером не более 0,2 мм, в отличие от раннемагматического титаномагнетита, грани не несут скульптуры роста и не затронуты процессом мартитизации.

Исследованием кристаллов магнетита микронзондовым и электронно-микроскопическими методами выявлено их однородное строение, без структуры распада и включений других фаз. По краю зёрен обычно наблюдается кайма железистого хлорита, по составу близкого к тюрингиту, нередко по трещинкам проникающего в минерал (рис. 9). Химический состав магнетита наследуется от раннемагматического титаномагнетита, отличаясь заметно низким содержанием Ti или его отсутствием и степенью очищенности от других примесных элементов. Вычисленные кристаллохимические формулы магнетита весьма близки к стехиометрии, особенно магнетиты пород Алейского массива (табл. 4).

Титан образует близкий уровень концентраций в магнетите рассматриваемых гранитоидов (0,54...0,87 %), за исключением магнетитов алейских пород, в которых примесь Ti не содержится, что объясняется нахождением в алейских гранитоидах гидротермального феррирутила. В составе магнетита отсутствуют примеси, характерные для раннемагматического титаномагнетита – Mg, Ge, Y, а также Mn, кроме магнетита алейских тоналитов, титаномагнетит которых также обогащён этим элементом. В магнетите лейкогранитной фазы Новониколаевского массива появляется примесь Cr и Al, не установленных в раннемагматическом титаномагнетите этих пород и указывает на накопление этих элементов в остаточном магматическом расплаве.

Примесь V в стабильных концентрациях (0,23...0,25 %) в магнетите рассматриваемых гранитоидных дифференциатов на порядок превышает количество этого элемента в раннемагматическом титаномагнетите заключительной лейкогранитной фазы. Отсутствие V в магнетите плагиогранитной фазы Новониколаевского интрузива, видимо, связано с неблагоприятными физико-химическими условиями для его вхождения в структуру магнетита. Способность V в постмагматическом

процессе проявлять литофильные свойства [15] не исключает его нахождение в постмагматических силикатах плагиогранитов (биотит, эпидот и др.) или миграцию в форме $[VF_3]$ в составе гидротермальных растворов за пределы интрузивного тела.

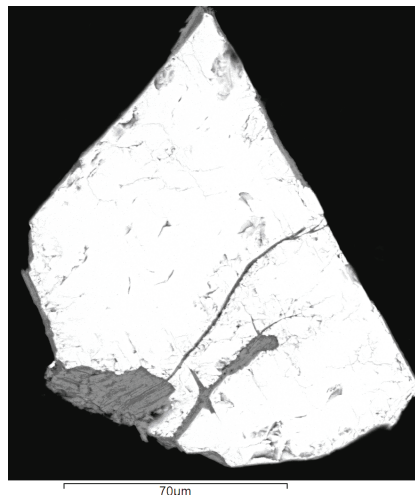


Рис. 9. Зерно магнетита (светлое), по краю зерна и по трещинкам – хлорит (серое). Лейкогранит, 4-я фаза, Новониколаевский массив

Исследованиями Н.А. Григорьева [17] распределения V в минералах и породах верхней части континентальной коры магнетит (титаномагнетит) с содержанием $V \geq 0,2$ % относится к V-богатому магнетиту. По уровню накопления V две изученные генетические разновидности – раннемагматический титаномагнетит и метасоматический магнетит – превышают минимальные значения для V-богатого магнетита, что позволяет рассматривать эти минералы главными концентраторами и носителями V, определяющими положительную геохимическую специализацию на ванадий гранитоидов алейско-змеиногорского комплекса.

Выводы

1. В гранитоидах полифазного алейско-змеиногорского комплекса (D_{2-3}) установлены две генерации акцессорного магнетита, отличающиеся уровнем содержания элементов-примесей, условиями и временем образования – раннемагматический титаномагнетит и постмагматический магнетит. Наибольшие весовые количества в гранитоидах образует раннемагматический титаномагнетит.
2. Раннемагматический титаномагнетит представляет собой продукт распада магнетит-ульвошпинелевого твёрдого раствора в процессе высокотемпературного окисления на раннемагматическом этапе в условиях повышенного парциального давления кислорода и относительной маловодности расплава. Различная степень распада-окисления обусловила широкий разброс содержаний Fe, Ti, Mn в титаномагнетитовой фазе.

3. Элементы-примеси титаномагнетита, представленные сидерофильной группой (Mn, V, Mg, Ge, Cr) и постоянно ассоциирующим с ними Y, при отсутствии халькофильных, являются типоморфным признаком гранитоидов алейско-змеиногорского комплекса – производных сложно дифференцированного базальтоидного расплава.
4. Уровень накопления V в титаномагнетите регулируется щелочностью расплава, кремнекислотностью и активностью летучих (F, Cl, P, H₂O). Калиевая направленность щелочности, повышенная кремнекислотность и возросшая активность летучих в заключительном лейкогранитном расплаве явились отрицательными факторами для концентрации V в титаномагнетите.
5. В процессе кристаллизации гранитоидов имело место связывание V в остаточном расплаве в комплексе [VF₃] с последующим его участием в магматогенных гидротермальных растворах и накоплением в постмагматическом магнетите гранитоидов, в том числе в лейкогранитах заключительной фазы.
6. Раннемагматический титаномагнетит выступает главным минералом-концентратом V, что отражает первичную сингенетическую обогащённость расплава этим элементом и геохимическую специализацию гранитоидов алейско-змеиногорского комплекса на Fe, Ti, V, а также Y и редкоземельные элементы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туркин Ю.А., Новоселов К.Л. Петролого-геохимические особенности девонских гранитоидов северо-западной части Рудного Алтая // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 5–15.
2. Новоселов К.Л., Туркин Ю.А. Девонский гранитоидный магматизм и геодинамические режимы его проявления в северо-западной части Рудного Алтая // Современные проблемы магматизма и метаморфизма: Матер. Всеросс. конф., посвящённой 150-летию академика Левинсон-Лессинга и 100-летию профессора Г.М. Саранчиной. Т. 2. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. – С. 100–103.
3. Туркин Ю.А. Тоналит-плагиогранит-лейкогранитовая формация Рудного Алтая // Природные ресурсы Горного Алтая. – 2009. – № 2. – С. 70–79.
4. Ефремова С.В., Стафеев К.Г. Петрохимические методы исследования горных пород: справочное пособие. – М.: Недра, 1985. – 511 с.
5. Buddington A.F., Lindsley D.H. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents // Journal of Petrology. – 1964. – V. 5. – P. 2. – P. 310–357.
6. Buddington A.F., Fahey J., Vlisidis A. Degree of oxidation of Adirondack iron oxide and iron-titanium oxide minerals in relation to petrogeny // Journal of Petrology. – 1963. – V. 4. – P. 1. – P. 173.
7. Ляхович В.В. Рациональная методика извлечения акцессорных минералов из гранитоидов. – М.: Недра, 1966. – 48 с.
8. Файф Дж. Несколько мыслей о гранитных магмах // Механизм интрузий магмы. – М.: Мир, 1972. – С. 173–187.
9. Магнетизм и условия образования изверженных горных пород / Д.М. Печерский, В.И. Багин, С.Ю. Бродская, З.В. Шарпова. – М.: Наука, 1975. – С. 9–36.
10. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. – М.: ИЛ, 1962. – 1132 с.
11. Макаров Е.С. Изоморфизм атомов в кристаллах. – М.: Атомиздат, 1973. – 288 с.
12. Ляхович В.В. Акцессорные минералы (их генезис, состав, классификация и индикаторные признаки). – М.: Наука, 1968. – 273 с.
13. Вахрушев В.А. Рудные минералы изверженных и метаморфических пород: справочное пособие. – М.: Недра, 1988. – 199 с.
14. Рябчиков И.Д., Когарко Л.Н. Термодинамический анализ магнетит + титанит + клинопироксеновых равновесий в апатитовой интрузии Хибинского щелочного комплекса // Щелочной магматизм, его источники и плюмы. Вып. 2: труды VII Междунар. семинара. – Иркутск–Неаполь, 2007. – Иркутск, 2007. – С. 38–47.
15. Борисенко Л.Ф. Ванадий (минералогия, геохимия и типы эндогенных месторождений). – М.: Недра, 1973. – 192 с.
16. Дымкин А.М., Пермяков А.А. Онтогенез магнетита (по материалам изучения природных руд и агломератов). – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. – 188 с.
17. Григорьев Н.А. Распределение ванадия в верхней части континентальной коры // Литосфера. – 2010. – № 4. – С. 142–151.

Поступила 12.12.2013 г.

ACCESSORY TITANOMAGNETITE TYPOMORPHISM OF DEVONIAN GRANITOIDS IN NORTH-WESTERN AREA OF RUDNI ALTAI

Konstantin L. Novoselov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University.

Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: nkonstantin1@rambler.ru.

Yuriy A. Turkin,

Cand. Sc., Gorno-Altai Expedition Ltd.,

Russia, Altai Territory, 659370, Biysk region, Maloeniseskoe, Sovetskaya street, 15. E-mail: jurtour@yandex.ru.

Research relevance consists in determining the demand in mineral geochemical investigation of potential granitoid ore-bearing complexes in Rudni Altai, embracing significant reserves of non-ferrous, noble and rare metals, which, in its turn, would expand the existing Russian mineral resources.

Research target is to identify the distinctive accessory titanomagnetite as typomorphism characteristics of potential ore-bearing polyphase Aleysky-Zmeinogorsk granitoid complexes.

Research methods in determining mineral chemical composition are: micro-sonde CAMEBAX-MICRO; electronic scanning microscope JSM-6510LV (Joel Ltd.) with energy-dispersive spectroscopy INCAEnergy350+.

Research results include the following: initial detailed investigation of accessory magnetite of Aleysky-Zmeinogorsk granitoids and identification of two generations – early-magnetic titanomagnetite and post-magnetic titanomagnetite. The first of which is the decomposition-oxidation of magnetite-ulvospinel structure system. The following siderophile inclusion elements are predominate – Mn, V, Mg, Cr, Ge, while lithophilic elements – Al, Si, Y are less and chalcophilic elements are absent. The post-magmatic magnetite genesis was determined, being the result of titanomagnetite leaching via magmatogene hydrothermal solutions and further crystallization of magnetite, which, in its turn, derives the chemical behavior of titanomagnetite itself. In this case it characterizes low content or absence of Ti and other inclusion elements. The characteristic of V behavior was noted – in the final leucogranite phases magnetite contains more V than in early-magnetic titanomagnetite.

Conclusion. Specific decomposition structure and titanomagnetite inclusion elements are typomorphic features of the basaltoid nature of granitoids. Specific potassic features of alkalinity, increased silica acidity and volatile activity during the final phase inhibit the possible V accumulation in titanomagnetite. Early-magnetic titanomagnetite is the mineral-concentrator V. This fact reflects the syngenetic enrichment of these melted elements and geochemical differentiation of Aleysky-Zmeinogorsk granitoids into Fe, Ti and V, as well as, Y and REE.

Key words:

Rudni Altai, granitoids, titanomagnetite, isomorphous system, decay structure, typomorphism.

REFERENCES

1. Turkin Yu.A., Novoselov K.L. Petrologo-geokhimicheskie osobennosti devonskikh granitoidov severo-zapadnoy chasti Rudnogo Altaya [Petrological and geochemical features of Devonian granitoids in north-west part of Rudny Altai]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 5–15.
2. Novoselov K.L., Turkin Yu.A. Devonskiy granitoidny magmatizm i geodinamicheskie rezhimy ego proyavleniya v severo-zapadnoy chasti Rudnogo Altaya [Devonian granitoid magmatism and geodynamic]. *Sovremennye problemy magmatizma i metamorfizma. Materialy Vserossiyskoy konferentsii, posvyashchennoy 150-letiyu akademika Levinson-Lessinga i 100-letiyu professora G.M. Saranchinoy* [Current problems of magmatism and metamorphism. Proc. All-Russian conference devoted to 150 anniversary of academician Levinson-Lessing and 100 anniversary of professor G.M. Saranchina]. Saint-Petersburg, SPbGU Publ., 2012, vol. 2pp. 100–103.
3. Turkin Yu.A. Tonalit-plagiogranit-leykogranitovaya formatsiya Rudnogo Altaya [Tonalite-plagiogranite-leucogranitic formation of Rudny Altai]. *Prirodnye resursy Gornogo Altaya*, 2009, no. 2, pp. 70–79.
4. Efremova S.V., Stafeyev K.G. *Petrokhimicheskie metody issledovaniya gornykh porod: Spravochnoe posobie* [Petrochemical methods of rocks investigation]. Moscow, Nedra, 1985. 511 p.
5. Buddington A.F., Lindsley D.H. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents. *Journal of Petrology*, 1964, vol. 5, p. 2, pp. 310–357.
6. Buddington A.F., Fahey J., Vlisidis A. Degree of oxidation of Adirondack iron oxide and iron-titanium oxide minerals in relation to petrogeny. *Journal of Petrology*, 1963, vol. 4, p. 1, 173 p.
7. Lyakhovich V.V. *Ratsionalnaya metodika izvlecheniya aktsessornykh mineralov iz granitoidov* [Rational methods of accessory minerals extraction from granitoids]. Moscow, Nedra, 1966. 48 p.
8. Fayf Dzh. Neskolko mysley o granitnykh magmakh [A few thoughts about the granitic magmas]. *Mekhanizm intruziy magmy* [Mechanism of magma intrusions]. Moscow, Mir, 1972. pp. 173–187.
9. Pecherskiy D.M., Bagin V.I., Brodskaya S.Yu., Sharapova Z.V. *Magnetizm i usloviya obrazovaniya izverzhennykh gornykh porod* [Igneous rocks magnetism and conditions of their formation]. Moscow, Nauka, 1975. pp. 9–36.
10. Ramdor P. *Rudnye mineraly i ikh srastaniya* [Ore minerals and their intergrowth]. Moscow, IL Publ., 1962. 1132 p.
11. Makarov E.S. *Izomorfizm atomov v kristallakh* [Isomorphism of atoms in crystals]. Moscow, Atomizdat, 1973. 288 p.
12. Lyakhovich V.V. *Aktsessornye mineraly (ikh genesis, sostav, klassifikatsiya i indikatornye priznaki)* [Accessory minerals (their genesis, composition, classification and indicate signs)]. Moscow, Nauka, 1968. 273 p.

13. Vakhrushev V.A. *Rudnye mineraly izverzhennykh i metamorficheskikh porod: Spravochnoe posobie* [Ore minerals of igneous and metamorphic rocks: Manual]. Moscow, Nedra, 1988. 199 p.
14. Ryabchikov I.D., Kogarko L.N. Termodinamicheskiy analiz magnetit + titanit + klinopiroksenovykh ravnovesiy v apatitonochnoy intruzii Khibinskogo shchelochnogo kompleksa [Thermodynamic analysis of magnetite + titanite + clinopyroxene balance in apatiteferous intrusion of Khibinsky alkaline complex]. *Shchelochnoy magmatizm, ego istochniki i plyumy. Trudy 7 Mezhdunarodnogo seminar* [Alkaline magmatism, its sources and plums. Transactions of 7th international seminar, Irkutsk – Napoli]. Irkutsk, 2007. Iss. 2, pp. 38–47.
15. Borisenko L.F. *Vanadiy (mineralogiya, geokhimiya i tipy endogennykh mestorozhdeniy)* [Vanadium (mineralogy, geochemistry and types of endogenic deposits)]. Moscow, Nedra, 1973. 192 p.
16. Dymkin A.M., Permyakov A.A. *Ontogeniya magnetita (po materialam izucheniya prirodnnykh rud i aglomeratov)* [Magnetite ontogeny (by materials of nature ores and agglomerates investigations)]. Sverdlovsk, UNTS AN SSSR, 1984. 188 p.
17. Grigorev N.A. Raspredelenie vanadiya v verkhney chasty kontinentalnoy kory [Vanadium distribution in upper part of continental crust]. *Litosfera*, 2010, no. 4. pp. 142–151.

Общая геология

УДК 551.4.04

ЭНДОГЕННЫЕ И ЭКЗОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ В ПРОЦЕССАХ ЭРОЗИИ, ПЕРЕНОСА И АККУМУЛЯЦИИ ОСАДКОВ НА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОМ ШЕЛЬФЕ ОСТРОВА САХАЛИН

Ильин Владимир Вениаминович,

старший преподаватель кафедры нефтегазового дела,
помощник проректора Сахалинского государственного университета,
Россия, 693000, Сахалинская область, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290.
E-mail: vladimirilyin7@gmail.com

Целью данной работы является оценка направленности развития процессов эрозии, переноса и аккумуляции осадочного материала от береговой зоны до границы шельфа. В результате инженерно-геологической съемки, выполненной на двух участках северо-восточного шельфа Сахалина, выявлена зависимость характера осадконакопления от геоморфологической и структурно-тектонической приуроченности объекта. Сопоставлено влияние друг на друга и взаимодействие эндогенных и экзогенных факторов в геологических процессах. Эндогенные факторы представлены геологическим строением территории исследований. Характеристика экзогенных факторов выражена в геоморфологических и океанологических условиях акватории исследований. Описаны современные отложения и донные формы рельефа от береговой линии до границы шельфа. Приведены рисунки записей профилей сейсмоакустического профилирования, выполненных в аналоговом формате. Глубина дешифрирования сейсмоакустических записей ограничена кратной волной, соответствующей глубине моря.

Ключевые слова:

Эндогенный фактор, экзогенный фактор, эрозия, аккумуляция, перенос осадков, сейсмоакустическое профилирование.

Исходные данные

Около 20 % территории побережья Сахалина преобразовано в результате инженерной деятельности [1]. Активное освоение прибрежно-шельфовой зоны началось в конце XX в. в связи с разработкой нефтегазовых месторождений. В конце 80-х – начале 90-х гг. на северо-восточном шельфе Сахалина была выполнена морская инженерно-геологическая съемка перспективных участков масштаба 1:50000. В данной статье по результатам съемки двух сопредельных участков – Луньской и Кириной съемочных площадей – проанализирована роль экзогенных и эндогенных факторов в процессах эрозии, переноса и аккумуляции осадочного материала для оценки их воздействия на объекты инженерной деятельности.

В пределах Луньской и Кириной площадей было выполнено более 2000 пог. км геофизических исследований – непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП), гидролокация бокового обзора, батиметрический промер; более

1000 станций донного пробоотбора на глубину 0,5...6,0 м по грунту; бурение инженерно-геологических скважин на море и на суше (около 1000 пог. м, глубина скважин 30...80 м); 25 станций статического зондирования на глубину 11 м по грунту, а также комплекс океанографических исследований с измерением скорости течений, волнения, высоты приливов-отливов, температуры, солености, ледовых характеристик и лабораторные исследования.

Воздействие эндогенных факторов исследуемого объекта находит отражение в его геолого-геоморфологическом строении, а экзогенных – в геоморфологическом строении и океанологических условиях района.

Эндогенные факторы

Геологическое строение

В геолого-тектоническом строении исследуемого участка шельфа выделяется два структурных этажа – осадочный чехол и акустический фунда-

мент (рис. 2). Первый сложен кайнозойскими отложениями, второй – мезо-палеозойскими метаморфическими породами. Кайнозойские отложения представлены нутовской свитой миоцен-раннеплейстоценового возраста мощностью более 1200 м. Чехол и фундамент разделены региональным несогласием и резко отличаются по степени деформированности. В истории деформаций неогенового осадочного чехла выделено две фазы: первая – относительно спокойного развития, когда деформации складкообразования не проявились, вторая – развитие антиклинальных складок и грабенообразных понижений по параллельным системам сбросов в позднем плиоцене – раннем плейстоцене.

На рис. 1–5 представлены записи пяти наиболее характерных профилей НСАП, расположенных последовательно по направлению от берега к

морю (курс СВВ 60°). Геолого-тектонический разрез от береговой линии до континентального склона протяженностью порядка 35 км представлен: в прибрежной части – Конгинской синклинальной зоной (рис. 1), распространенной до 12 км от береговой линии; далее в разрезе выделяется Валская антиклинальная зона Восточно-Сахалинского антиклинория, в пределах которой на расстоянии 12...18 км от берега развита Луньская антиклинальная складка (рис. 2) и на расстоянии 28...30 км – Киринская антиклинальная складка (рис. 4, 5), между складками наблюдается хорошо выраженное структурное понижение (рис. 3, 4).

Простираение структур – СЗ 343°. Размер Луньской складки – 24,5×6,5 км, Киринской – 11×2 км. Луньская структура осложнена дизъюнктивными нарушениями, которые делают ее на

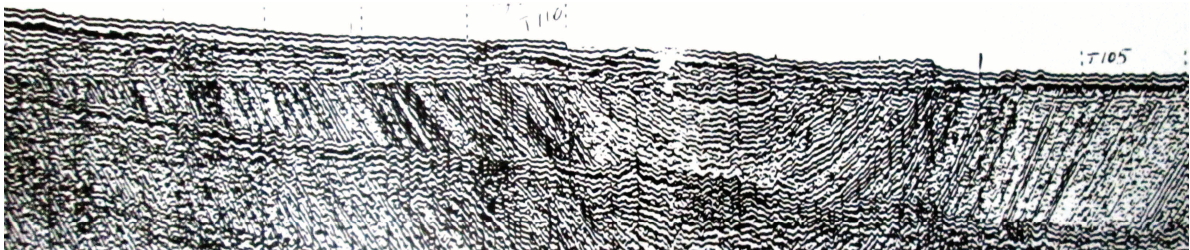


Рис. 1. Современные и четвертичные отложения в районе берегового склона, Конгинской синклинальной зоны и западной границы Луньской структуры (запись НСАП)

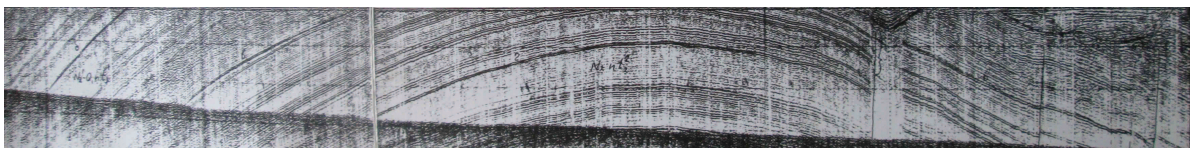


Рис. 2. Луньская структура на записях НСАП (с запада на восток)

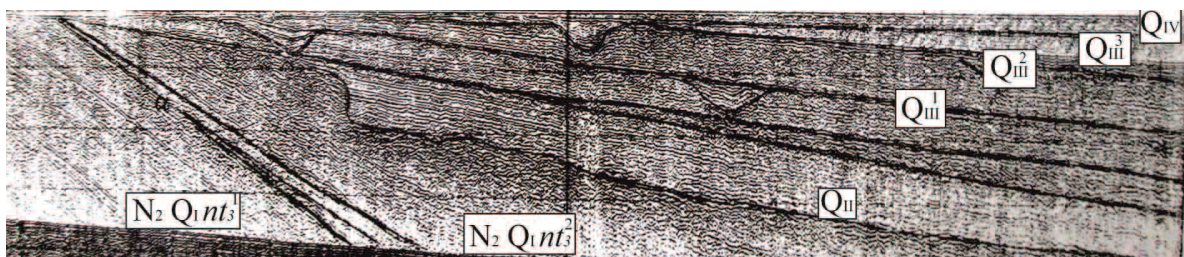


Рис. 3. Граница коренных неоген-четвертичных и четвертичных отложений на восточном участке Луньской структуры (запись НСАП)

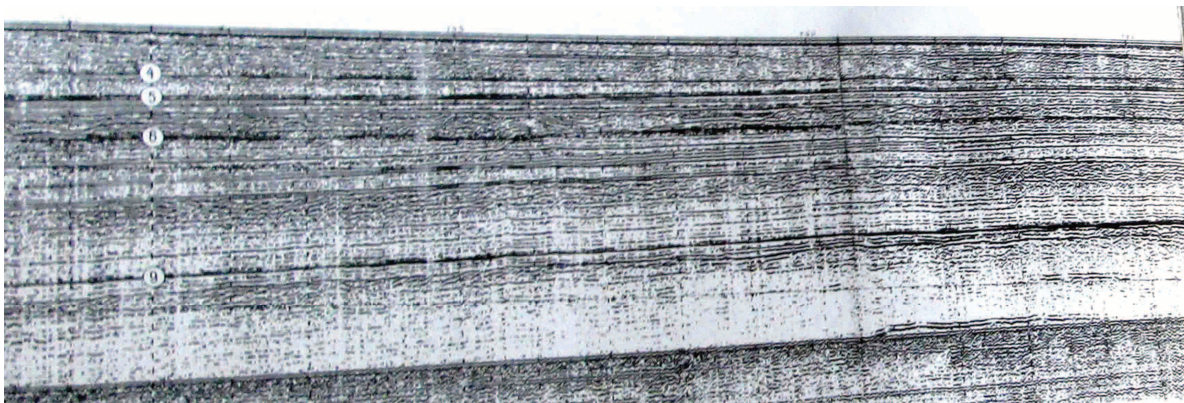


Рис. 4. Четвертичные отложения на западном участке Киринской структуры (запись НСАП)

три блока – северный, центральный и южный. Кири́нская структура разделена на северный и южный блоки.

Четвертичные отложения в пределах исследуемой акватории развиты неравномерно. Их мощность и формы залегания прослежены на временных разрезах НСАП, подтверждены данными инженерно-геологического бурения и донного опробования. В районе подводного берегового склона (Конгинская синклиальная зона) мощность четвертичных отложений составляет от первых метров до 15...20 м (рис. 1). В районе Луньской антиклинальной складки – от первых сантиметров до 2,0...2,5 м (рис. 2, 6). На участке между Луньской складкой и Кири́нской мощность достигает 65 м (рис. 3, 4). В районе Кири́нской антиклинальной складки мощность четвертичных отложений уменьшается до 30...35 м (рис. 4, 5), далее, в сторону моря, их мощность увеличивается до 115 м и более (рис. 5).

Граница между четвертичными и коренными отложениями в районе Конгинской синеклизы и Луньской складки резко несогласная, в районе Кири́нской структуры – конформная. На сейсмоакустических записях она выражена в виде регионального несогласия.

Четвертичный геологический разрез представлен в полном стратиграфическом объеме и имеет хорошие корреляционные горизонты. Нижняя возрастная граница четвертичных отложений в абсолютном выражении оценивается в 450 тысяч лет. Осадки отлагались в условиях открытого моря, в обстановке с переменным энергетическим уровнем. На сейсмоакустических записях хорошо просматривается трансгрессивно-регрессивная цикличность осадконакопления (рис. 3). Выделенные границы стратиграфо-генетических комплексов имеют региональный характер и отражают эвстатические колебания уровня моря и геолого-тектоническую историю развития района.

Минералогический состав осадков – кварц, плагиоклаз, циркон, сфен, силлиманит, рутил, лейкоксен, апатит, турмалин, марказит, ильменит, амфиболы, пироксены, гранаты, смектит, гидрослюда, каолинит, хлорит. Каких-либо закономерностей в распределении минералов в зависимо-

сти от удаленности от берега, глубины моря и положения в рельефе не выявлено.

Через описанные структуры проходит несколько палеодолин глубиной от 5 до 20 м ранне-средне-четвертичного возраста (рис. 3).

Экзогенные факторы

Глубина моря и океанологические условия

Глубина моря в районе берегового склона (Конгинская синеклиза) изменяется от 0,0 до 20...25 м, в районе Луньской структуры – от 20...25 до 45...50 м, на участке между Луньской и Кири́нской – от 45...50 до 65...90 м, в районе Кири́нской структуры – 90...105 м, далее до 115 м и глубже [2, 3].

Средняя высота волн в районе в июне–августе составляет 1,5...2,0 м, в сентябре–ноябре – 2,0...2,5 м. Максимальная высота волны, зафиксированная с буровой установки, составила 11,5 м, а максимальная расчетная высота волны (один раз в 50 лет) – 17,0 м [4].

В районе проходит холодное Северо-Сахалинское течение. Его средняя скорость в придонных слоях составляет 10...20 см/с. Эллипсы приливно-отливных течений ориентированы субпараллельно береговой линии. Средняя скорость суммарных течений в пределах Луньской площади на поверхности составляет 40...50 см/с, в придонных слоях – 20...25 см/с. Максимальная зарегистрированная скорость на глубине 48 м в придонном слое составила 97 см/с [5, 6].

Кроме того, на береговую линию и водные потоки оказывают воздействие силы Кориолиса. Совместное действие волнения и течений увеличивает интенсивность переноса осадков.

Современные отложения и донные формы рельефа

По набору фракций в литологическом составе современных отложений выделяются осадки однородные (однокомпонентные) и смешанные (многокомпонентные). В основном встречаются смешанные – песок мелкий-средний-алевритистый, песок с гравием и галькой, песок с глинистыми частицами и т. д. Поставщиком осадочных материалов служат разрушающиеся берега и размываемые коренные донные породы, сложенные слаболитифи-

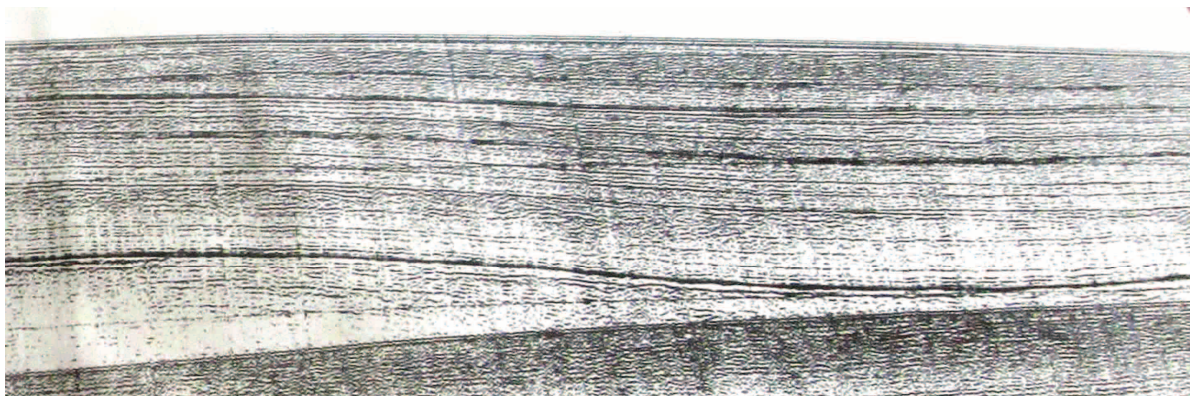


Рис. 5. Четвертичные отложения на восточном участке Кири́нской структуры (запись НСАП)

цированными и слабосцементированными отложениями нутовской свиты, а также вынос рек, ледовый разнос и пирокластические выбросы окружающих вулканов [7].

Преобладание грубообломочной составляющей характерно для береговой и волноприбойной части шельфа на глубине от 0 до 20 м. На этих участках перенос осадков осуществляется в сторону моря и обратно за счет приливно-отливных и штормовых процессов. Также перенос и смещение осадков здесь частично выполняется Северо-Сахалинским течением в южном направлении.

На глубинах моря более 20 м преобладает перенос песка мелкого и более тонких фракций. Перемещение материала осуществляется в южном направлении под воздействием Северо-Сахалинского течения.

В периоды отсутствия штормов основной перенос осадков осуществляется в придонном слое, толщина которого составляет до 1,0...1,5 м. Во время штормов активно разрушаются береговые и донные формы рельефа на глубине моря до 20 м и толщина потока перераспределения осадочного материала увеличивается на соответствующую величину. В зимне-весенний период осадочный материал также поступает на всю территорию шельфа за счет ледового разноса.

На участках с преобладанием аккумулятивных процессов рельеф дна выполнен реликтовыми аккумулятивными формами в виде песчаных гряд и валов. На них развиваются современные крупные формы – песчаные волны (песчаные валы или «гигантская рябь»), имеющие протяженность более 200 м, ширину до 250 м, высоту 2...3 м (рис. 7). На крупных формах, в свою очередь, развиваются

мелкие мезо-формы – мелкие песчаные волны протяженностью менее 200 м, шириной – 10...20 м, высотой – около 1 м. Еще меньшие размеры имеет рябь течений, развитая по всей площади исследований: протяженность достигает 1 м, ширина – до 0,5 м, высота – 0,05 м.

Выявленные в ходе повторных промеров перемещения крупных песчаных волн, сопровождаются значительным переносом осадков. По предварительным оценкам, количество вовлекаемого в движение материала составляет 0,5...1,0 млн м³ на один квадратный километр [8].

В пределах Луньской структуры современные отложения в районе купольной части складки, как было сказано выше, практически отсутствуют (рис. 6). На протяжении всего четвертичного времени структура испытывает устойчивое поднятие, в результате чего вершинная часть складки была срезана, и осадочный материал перераспределен по шельфу, континентальному склону и глубоководной котловине. В пределах купольной части структуры отсутствуют аккумулятивные формы рельефа, что подтверждает факт продолжающегося процесса поднятия блока и развивающейся эрозионной обстановки.

Аккумулятивные формы донного рельефа, зафиксированные между Луньской и Киринской структурами, – песчаные гряды и волны, на которых развиваются мелкие аккумулятивные формы (рис. 7). Аналогичные формы выявлены южнее и севернее структур, а также в районе берегового склона в пределах Конгинской синеклизы. Как было отмечено выше, они постоянно перемещаются в виде песчаных валов и «гигантской ряби», заполняя межгрядовые ложбины и впадины.

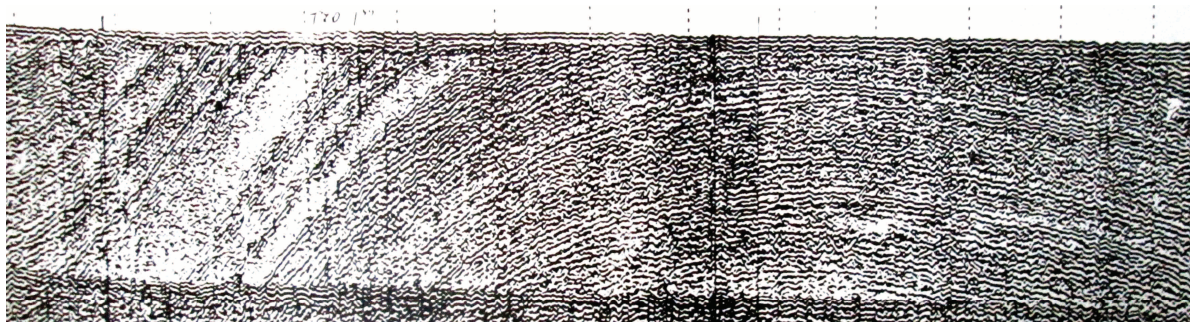


Рис. 6. Современные и четвертичные отложения в районе Луньской структуры – горизонтальная слоистость в верхней части разреза (запись НСАП)

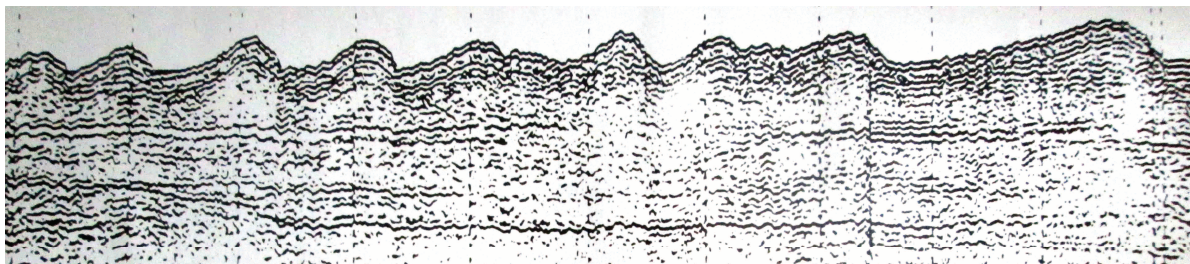


Рис. 7. Донные формы рельефа на глубине моря 45...50 м на участке между Луньской и Киринской структурами (запись НСАП)

В районе Конгинской синеклизы (рис. 1) на фоне общего увеличения глубины моря по мере удаленности от берега наблюдаются участки локального понижения рельефа до 3...5 м в виде вытянутых параллельно береговой линии долин протяженностью до нескольких километров и шириной до 1...2 км. Это участки синеклизы с выраженным нисходящим движением структуры и проявленным дефицитом осадочного материала, т. е. участки, скорость опускания которых выше скорости современного осадконакопления.

Выводы

Следует отметить, что наибольшее влияние на современные процессы переноса и отложения осадочного материала на северо-восточном шельфе Сахалина оказывают эндогенные факторы и интенсивность их проявления. Экзогенные факторы являются вторичными, наложенными на эндогенные. Так, в прибрежно-морской зоне, где идет интенсивное разрушение берега и вынос аллювия реками, наблюдается дефицит осадочного материала на участке с интенсивным развитием нисходящих процессов в Конгинской синеклизе, выражающееся в локальных понижениях рельефа морского дна.

В то же время в пределах купольной части Луньской антиклинальной складки, которая на протяжении всего четвертичного периода была подвержена процессу устойчивого поднятия, на-

блюдается практически полное отсутствие осадочного материала. Скорее всего, это продукты собственного разрушения самой структуры, которые также будут с нее перемещены на прилегающие территории, характеризующиеся аккумулятивными обстановками, обусловленные равновесным состоянием тектонических процессов или нисходящими движениями блоков земной коры.

В районе купольной части Кириной складки, судя по характеру накопления осадков, наблюдается некоторое преобладание восходящих движений над процессами осадконакопления, что выражается в уменьшении мощности разновозрастных слоев в районе структуры и их увеличением в межструктурных понижениях, а также характерным изгибом в виде купола всей толщи четвертичных отложений.

Реликтовые валы имеют достаточно продолжительную жизнь в сравнении с развитыми на них мезоформами, но и они в конечном итоге разрушаются, а межгрядовые впадины заполняются осадочным материалом.

Направленность и развитие современных процессов на каждом конкретном участке шельфа зависит от его структурной приуроченности и соответствующего состояния эндогенных факторов, а объемы поступающего материала и его перемещение обеспечивают экзогенные факторы.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов ФЦП № 14.B37.21.0584 и 14.B37.21.0604.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Первухин С.М. Природные ресурсы прибрежной зоны острова Сахалин: дис. ... канд. геогр. наук. – Владивосток, 2011. – 142 с.
2. Пищальник В.М., Бобков А.О. Океанографический атлас шельфовой зоны острова Сахалин: в 2 ч. Ч. 1. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2000. – 174 с.
3. Пищальник В.М., Бобков А.О. Океанографический атлас шельфовой зоны острова Сахалин: в 2 ч. Ч. 2. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2000. – 108 с.
4. Использование данных дистанционного зондирования при изучении ледовой обстановки в дальневосточных морях / В.А. Мелкий, В.М. Пищальник, А.А. Гальцев, В.А. Романюк, И.В. Еременко, Н.С. Семенов, И.Г. Минервин // Земля из космоса – наиболее эффективные решения: Матер. V Междунар. конф. – М.: СпбЭкс, 2011. – С. 143–144.
5. Mathematical modeling of water circulation on eastern shelf of Sakhalin island / V.M. Pishchalnik, V.S. Arkhipkin, A.V. Leonov, I.G. Minervin, V.A. Melkiy // The 28th International symposium on Okhotsk sea & sea ice. – Mombetsu: OSCORA, 2013. – P. 300–303
6. Мелкий В.А., Марчуков В.С., Игрицов М.А. Методика автоматизированного ландшафтного дешифрирования космических изображений // Изв. Вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1998. – № 4–5. – С. 68–82.
7. Мелкий В.А. Разработка теории аэрокосмического мониторинга вулканопасных территорий // Геодезия и картография. – 2000. – № 11. – С. 52–53.
8. Мелкий В.А., Зенкин О.В., Малинников В.А. Применение спутниковых данных MODIS для оценки антропогенных загрязнений вод Охотского моря // Изв. Вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 6. – С. 160–166.

Поступила 26.04.2013 г.

UDC 551.4.04

ENDOGENOUS AND EXOGENOUS FACTORS AT SEDIMENT EROSION, TRANSPORTING AND ACCUMULATION IN THE NORTH-EAST SHELF OF SAKHALIN ISLAND

Vladimir V. Ilin,

Sakhalin State University, Russia, 693000, Yuzhno-Sakhalinsk, Lenin street, 290.

E-mail: vladimirilyin7@gmail.com.

The purpose of the research is to estimate the direction of sediment erosion, transporting and accumulation development from the sea coast to the shelf border. The author has determined the dependence of sedimentation character on geomorphologic and structural object association based on the results of engineering-geological survey of two areas of North-East shelf of Sakhalin island. The influence and interaction of endogenous and exogenous factors in geocological processes were investigated. The endogenous factors are represented by geological conditions of the territory. The characteristics of exogenous factors are represented in geomorphologic and oceanological conditions. The paper describes current deposits and bottom-living forms of the relief from the sea coast to the shelf border. The paper introduces the pictures of sub-bottom profiles in analog format. The depth of analog recording is limited by the depth of the sea bottom.

Key words:

Endogenous factor, exogenous factor, erosion, accumulation, sediment transporting, sub-bottom profiling.

REFERENCES

1. Pervukhin S.M. *Prirodnye resursy pribrezhnoy zony ostrova Sakhalin. Dis. kand. geogr. nauk* [Natural resources of the sea coast area of the Sakhalin island. Cand. Diss.]. Vladivostok, 2011. 142 p.
2. Pishchalnik V.M., Bobkov A.O. *Okeanografichesky atlas shelfovoy zony ostrova Sakhalin* [The oceanographic atlas of the shelf zone of the Sakhalin island]. Yuzhno-Sakhalinsk, SakhGU, 2000. B. 1, 174 p.
3. Pishchalnik V.M., Bobkov A.O. *Okeanografichesky atlas shelfovoy zony ostrova Sakhalin* [The oceanographic atlas of the shelf zone of the Sakhalin island]. Yuzhno-Sakhalinsk, SakhGU, 2000. B. 2, 108 p.
4. Melkiy V.A., Pishchalnik V.M., Galtsev A.A., Romanyuk V.A., Eremenko I.V., Semenov N.S., Minervin I.G. *Ispolzovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya pri izuchenii ledovoy obstanovki v dalnevostochnykh moryakh* [Use of distance investigation data in researching sea ice conditions of the Far East seas]. *Zemlya iz kosmosa – naibolee effektivnye resheniya. Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii* [Earth from the space – the most efficient solutions. Proc. of the V international conference]. Moscow, SknEks, 2011. pp. 143–144.
5. Pishchalnik V.M., Arkhipkin V.S., Leonov A.V., Minervin I.G., Melkiy V.A. *Mathematical modeling of water circulation on eastern shelf of Sakhalin island. The 28th International symposium on Okhotsk sea & sea ice*. Mombetsu, OSCORA, 2013. pp. 300–303.
6. Melkiy V.A., Marchukov V.S., Igritsov M.A. *Metodika avtomatizirovannogo landshaftnogo deshifirovaniya kosmicheskikh izobrazheniy* [The methodology of automatic investigation of space pictures]. *Izvestiya Vuzov. Geodezia i aeriofotozemka*, 1998, no. 4–5, pp. 68–82.
7. Melkiy V.A. *Razrabotka teorii aerokosmicheskogo monitoringa vulkanoopasnykh territoriy* [Development of the theory of space monitoring for volcano hazardous territories]. *Geodezia i kartografiya*, 2000, no. 11, pp. 52–53.
8. Melkiy V.A., Zenkin O.V., Malinnikov V.A. *Primeneniye sputnikovykh dannykh MODIS dlya otsenki antropogennykh zagryazneniy vod Okhotskogo morya* [Application of MODIS space data for assessing the Okhotsk sea water pollution]. *Izvestiya Vuzov. Geodezia i aeriofotozemka*, 2007, no. 6, pp. 160–166.

Литология

УДК 553.984:552.54

ЛИТОЛОГИЯ И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕНДСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ГЕОСИНЕКЛИЗЫ

Ковешников Александр Евгеньевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. ФГБУН Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, Томск, Академический пр., 3. E-mail: sanika@tpu.ru

Конторович Владимир Алексеевич,

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30; член-корреспондент РАН. Заместитель директора, зав. лабораторией сейсмогеологического моделирования природных нефтегазовых систем ФГБУН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3. E-mail: KontorovichVA@ipgg.sbras.ru

Макаренко Светлана Николаевна,

канд. геол.-минерал. наук, ст. научн. сотр. лаборатории микропалеонтологии геолого-географического факультета Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: s.makarenko@ggf.tsu.ru

Татьянин Геннадий Михайлович,

канд. геол.-минерал. наук, декан геолого-географического факультета Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: gmt@mail.tsu.ru

Терлеев Александр Анатольевич,

канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр. ФГБУН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3. E-mail: Terleeva@ipgg.sbras.ru

Токарев Дмитрий Александрович,

науч. сотр. ФГБУН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3. E-mail: Tokarevda@ipgg.sbras.ru

В последние годы на территории юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы установлено распространение вендских отложений на значительно большей, чем считалось ранее, территории. В связи с этим изучение условий накопления вендских образований становится актуальным в связи с возможной приуроченностью к ним месторождений нефти и газа. Целью исследования является, на основе проведенного изучения фаунистических остатков и достоверного установления наличия вендских отложений, изучения особенностей литологического состава отложений и, с применением метода палеогеографических реконструкций, выявление особенностей распространения того или иного выявленного литологического типа пород по площади их распространения. По результатам проведенной работы и с учётом ранее проведенного анализа тектонического строения юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы установлено широкое распространение вендских доломитов и известняков чистого карбонатного состава, без примеси терригенного материала. Они прослежены в пределах не только Вездеходного и Тыйского структурно-фациального районов (СФР), как было известно ранее, но и на территории Нюрольского и, предположительно, Колпашевского структурно-фациальных районов. Это позволило сделать вывод о существовании в венде – раннем кембрии на обширной территории с центром около Вездеходной площади Вездеходного СФР карбонатной платформы, отложения которой при широком развитии процессов вторичного преобразования пород становятся перспективными на углеводороды. Проведение соответствующего комплекса работ могло способствовать открытию месторождений нефти и газа в докембрийских карбонатных породах.

Ключевые слова:

Докембрийские карбонатные породы, венд, Западно-Сибирская геосинеклиза, карбонатная платформа.

Вендские отложения в юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы

На территории Западно-Сибирской геосинеклизы доюрские отложения подразделены на 23 структурно-фациальных района [1, 2]. В основу такого разделения положены особенности литологического состава пород разрезов скважин, что в определенной степени отражает разнообразные обстановки осадконакопления, существовавшие в разные эпохи в позднем докембрии и палеозое (рис. 1).

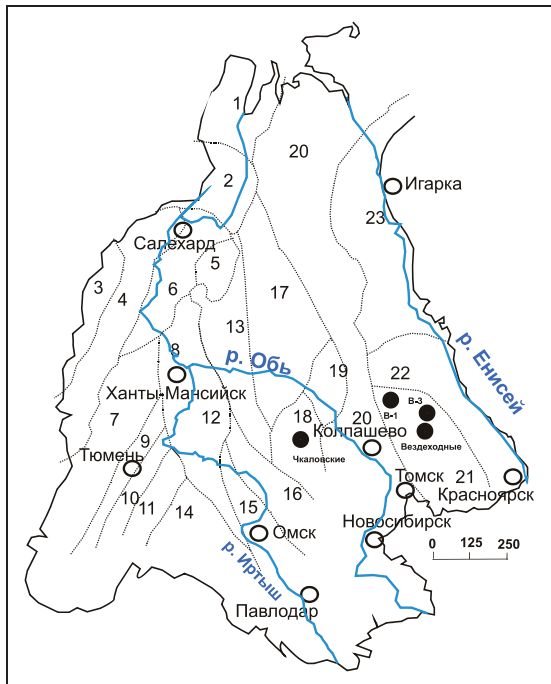


Рис. 1. Схема структурно-фациального районирования палеозойских отложений Западно-Сибирской геосинеклизы [3, 4]. Показаны скважины, вскрывшие вендские отложения. Структурно-фациальные районы (СФР): 1 – Бованенковский; 2 – Новопортовский; 3 – Тагильский; 4 – Березово-Сартыньинский; 5 – Ярудейский; 6 – Шеркалинский; 7 – Шаимский; 8 – Красноленинский; 9 – Тюменский; 10 – Косолаповский; 11 – Уватский; 12 – Салымский; 13 – Усть-Балыкский; 14 – Ишимский; 15 – Тевризский; 16 – Туйско-Барабинский; 17 – Варьеганский; 18 – Нюрольский; 19 – Никольский; 20 – Колпашевский; 21 – Вездеходный; 22 – Тыйский; 23 – Ермаковский. Скважины: Вездеходные – все скважины Вездеходной площади; Чкаловские – все скважины Чкаловской площади; В-1 – Восток-1; В-3 – Восток-3

На востоке Западно-Сибирской геосинеклизы установлено распространение вендских отложений [1, 3, 4]. В пределах Восточной Сибири в отложениях этого возраста открыт ряд месторождений углеводородов, что ставит в ряд перспективных и площади на территории Западной Сибири, характеризующиеся близким литологическим типом разрезов и возрастом. Перспективы вендских отложений подтверждаются прослеживанием их на севере Нюрольского СФР, в разрезах скважин Чкаловского нефтегазоконденсатного месторождения [5–10].

Изучению особенностей литологического состава отложений венда, пройденных бурением в пределах Чкаловского нефтегазоконденсатного месторождения, Вездеходной площади и параметрических скважин Восток-3 и Восток-1, выявлению закономерностей строения, корреляции, слагающих толщ и условиям их формирования посвящена настоящая статья.

Типы разрезов вендских отложений Западно-Сибирской геосинеклизы

В юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы вендские отложения представлены тремя типами разрезов (рис. 1):

- на территории Вездеходного СФР:
1 – **Вездеходный** (скважины Вездеходной площади);
2 – **Востоковский** (скважины Восток-1, Восток-3);
- на территории Нюрольского СФР:
3 – **Чкаловский** (скважины Чкаловской площади).

Вездеходный СФР

В пределах Вездеходного СФР (восток Томской области) установлено два типа разреза: Вездеходный и Востоковский.

Таблица 1. Отложения венда и нижнего-среднего кембрия Западно-Сибирской геосинеклизы (свита, возраст, № скважины: интервал, м)

Нюрольский СФР		Вездеходный СФР	
Чкаловская пл.	Вездеходная пл.	Восток-3	Восток-1
Є ₁₋₂ (пока бурением не установлены)		Пайдугинская, Є ₁₋₂ 3635–3660	Пайдугинская, Є ₁ 4825–4945
Чурбигинская, Є ₁₋₂ 210: 3014–2993 9: 3152–3066 Вездеходная, Є ₁₋₂ 2: 3008–2963	Вездеходная, V-Є ₁₋₂ 4: 3106–3541	Чурбигинская, Є ₁₋₂ 3660–3870	Чурбигинская, Є ₁ 4945–5010
«Чкаловская», V ₃ 10: 3160–2940 26: 2977–2925 210: 3022–3014 2: 3079–3008 9: 3250–3152		Райгинская, V ₃ 3870–4191	?
Котоджинская, V ₃ 4: 3075–3045 17: 3081–3028 501: 3300–2908 26: 3100–2987 2: 3106–3079	?	Котоджинская, V ₃ 4191–4582	?
V	?	Пойгинская, V ₃ 4582–5002	?

Вездеходный тип разреза

Вездеходный тип разреза представлен отложениями вездеходной толщи, в состав которой входят светло-серые доломиты, строматолиты, доломитизированные аргиллиты, линзы и тела туфопесчаников и андезитов. Возраст толщи в типовом разрезе

скв. Вездеходной 3 (интервал 3865–3085 м, мощность 780 м) по альгофлоре и микрофитолитам определен в диапазоне венд – ранний кембрий. Граница между вендом и кембрием предположительно проводится на глубине 3500 м. Толща также прослежена в разрезе скважин 1 и 4 [3].

Вездеходная толща в разрезе параметрической скважины Вездеходной 4 пройдена в интервале 3541,5–3106 м (видимая мощность 435 м). Верхняя граница эрозионная. Подстилается эффузивно-осадочной лисицынской толщей, контакт с которой несогласный, возможно, тектонический. В призабойной части вскрыт интрузивный массив [8]. Нижняя и верхняя границы вездеходной толщи, а следовательно, и её объем в разрезе скважины 4 не выявлены. Предполагается увеличение объема вверх по разрезу за счет надстраивания верхней части строматолитовой толщи, пройденной скважиной 3 [3].

В основании вездеходной толщи (интервал 3541,5–3536 м) подняты известняки темно-серые, черные, мелко-тонкозернистые, доломитизированные, массивные однородные. Найдены вендские микрофитолиды формы *Vesicularites*.

Выше по разрезу, в интервале 3535,6–3500 м встречены гематитизированные аргиллиты, розовые калькарены, красноцветные аргиллиты с прослоями кварцитовидного песчаника. По данным ГИС и литологии предполагается развитие карста или сильное выщелачивание породы в приразломной зоне [3].

С глубины 3500 м и выше, до 3105, 8 м, скважиной вскрыта толща серых, темно-серых узорчато-полосчатых строматолитовых доломитов. Характерно развитие строматактоидных и крустификационных структур, первичная биогенная пористость и кавернозность. Породы окварцованы, карбонатизированы, сульфидизированы, содержат примесь битуминозного вещества. Возраст строматолитовой толщи по данным М.Е. Раабен [3] в интервале 3500–3283,1 м – венд, выше, вероятно, – кембрий. По разрезу отмечены выпоты и запахи углеводородов.

Востоковский тип разреза

Впервые на территории Вездеходного СФР подразделения вендского возраста в ранге свит установлены по разрезу скважины Восток-3 [4]: (снизу вверх) пойгинская, котоджинская и райгинская.

Пойгинская свита V_{pg} (интервал 5002–4582 м, видимая мощность 420 м). Серые неравномерно перекристаллизованные доломиты. Наблюдаются признаки реликтовых пластово-строматолитовых, доларенитовых, пелитоморфных разностей с повсеместным развитием пор и каверн в виде полос и пятен. Нижняя граница проводится условно ниже забоя скважины по геофизическим данным. Возраст – венд.

Котоджинская свита V_{kt} (интервал 4582–4191 м, видимая мощность 391 м). Темно-серые, серые, светло-серые доломиты, среди кото-

рых преобладают переслаивающиеся доларениты (песчаники доломитового состава) и слабо перекристаллизованные доломиты. Присутствует примесь алюмосиликокластики пелитовой и алевроитовой размерности (кварц, мусковит), редкие тонкие прослойки кремней, повышается содержание углеродистого вещества (в сравнении с нижележащими породами). В шлифах остатки рода *Namacalathus*.

Райгинская свита V_{rg} (интервал 4191–3870 м, видимая мощность 321 м). По ГИС установлено циклическое строение [4, 10]: четыре крупных циклита (мощностью 95–130 м), каждый из которых в нижней части сложен обломочными известняками с прослоями песчаников, алевролитов и аргиллитов, обогащенных обломочной слюдой, а в верхней части – тонкообломочными известняками. Нижняя граница свиты резкая. Характерна градационная, косая, параллельная и линзовидная слоистость. Подразделяется на три подсвиты. В породах нижней подсвиты обнаружены *Namacalathus*, в средней установлены микрофитолиды, в верхней фауны не установлено. Средняя подсвита соответствует отложениям поздневендского, котлинского возраста. Скелетные остатки *Namacalathus* в скважине Восток-3 подтверждают поздневендский возраст отложений котоджинской и райгинской свит.

Таким образом, Востоковскому типу разреза соответствует накопление строматолитовых доломитов (пойгинская свита), переходящих вверх по разрезу в доломиты с остатками *Namacalathus* (котоджинская свита), завершается разрез циклитами райгинской свиты, сложенными известняками с прослоями терригенных пород.

Нюрольский СФР

В пределах Нюрольского СФР палеонтологически обоснованные отложения венда впервые выявлены в разрезах скважин Чкаловского нефтегазоконденсатного месторождения [5–7]. Они составляют чкаловский тип разреза.

Чкаловский тип разреза

На территории Чкаловской площади для карбонатных отложений доломитового и известнякового состава, по которым авторами [5–7] определен возраст пород как поздневендский, установлена следующая литологическая приуроченность отложений различного возраста (табл. 1).

В целом венд-кембрийский разрез на территории Чкаловской площади, при сопоставлении их с вендскими отложениями, вскрытыми бурением по скважине Восток-3, представляется в следующем виде (рис. 2).

Котоджинская свита V_{kt}

Возрастной аналог пойгинской свиты в разрезах Чкаловских скважин пока не установлен.

Доломитовые породы и доломитовые брекчии, пройденные скважинами 17 (видимая мощность

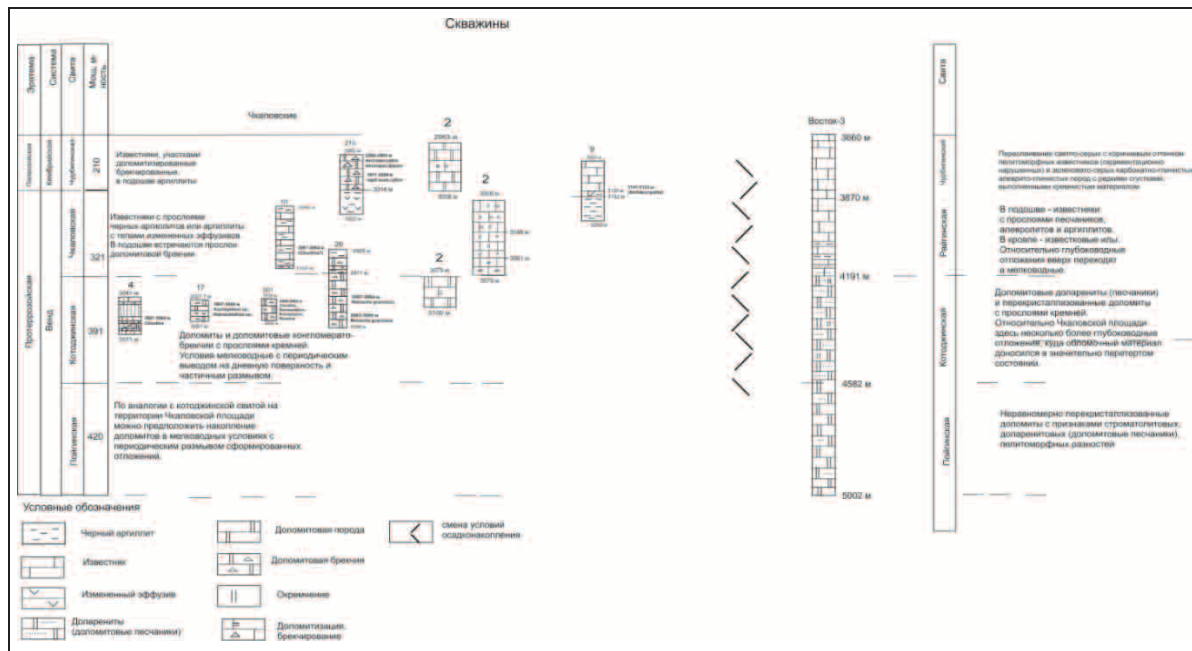


Рис. 2. Сопоставление разрезов венда-кембрия Вездеходного (Восток-3) и Нюрольского (Чкаловские скважины) СФР

17 м), 501 (видимая мощность 62 м), нижней частью скважины 26 (инт. 3100–2987 м, видимая мощность 113 м), возможно, нижней частью скважины 2 (инт. 3106–3079 м, видимая мощность 27 м) можно сопоставить с доломитами котоджинской свиты (табл. 2).

В целом разрез толщи представлен доломитовой породой с прослоями доломитовой брекчии, на отдельных участках и прослоях содержащих примесь кремнистого материала. Нижняя граница толщи в разрезах не установлена, верхняя вскрыта в скважине 26.

В разрезе скважины 2 возрастные определения отсутствуют, и аналоги котоджинской свиты, представленные доломитами и доломитизированными известняками, установлены в интервале 3106–3079 м (рис. 3).

«Чкаловская» толща

Вверх по разрезу в скважине 2 (интервал 3079–3008 м) (рис. 3) установлена толща «чкаловская» – предполагаемый аналог райгинской свиты. Вынос керна незначительный, 12,8 м (интервалы 3063,6–3059,6, 3054,3–3040,8 м) из 71 м пройденного бурением участка. Аналогичные образования установлены в скважинах 4, 10, 26 (табл. 3). Толща выделяется условно, в основном по ГИС и литологии, органические остатки установлены в скважине 10 (интервал 3165–3160 и 2980–2940 м, фауна *Korilophyton* sp).

В разрезе скважины 2 по описаниям и ГИС пройдены следующие породы: в интервале 3079–3061 м – известняки черные трещиноватые окварцованные; в интервале 3061–3048 м – известняки мраморизованные окварцованные; в интервале 3048–3008 м – из-

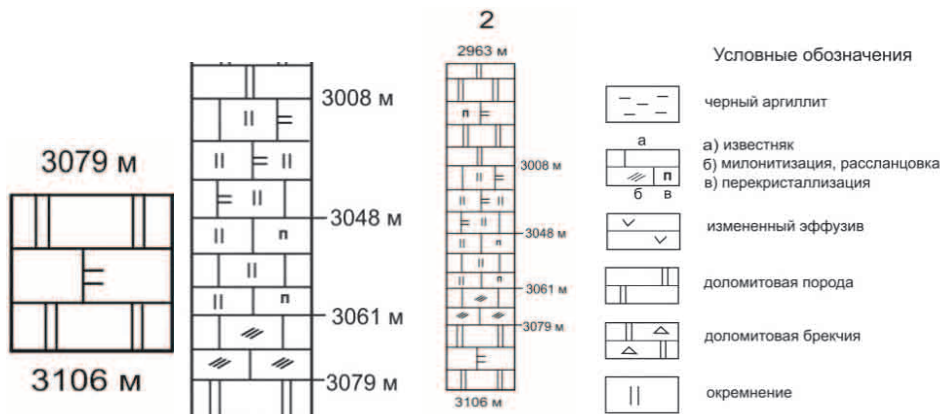
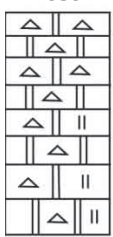
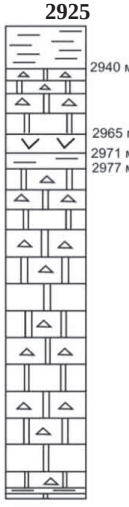


Рис. 3. Разрез скважины Чкаловская-2. Интервал 3106–3079 м – аналог котоджинской свиты; интервал 3079–3008 м – «чкаловской» толща, в интервале 3008–2963 м – отложений нижнего кембрия, аналог вездеходной толщи

вестняки доломитизированные окварцованные. Выше залегают выделенные по литологическим данным доломиты, переслаивающиеся с известняками доломитизированными, участками мраморизованными, которые с определенной долей условности могут быть отнесены к нижнему кембрию.

Таблица 2. Аналоги котоджинской свиты на территории Чкаловской площади

Колонка (м)	Скважина, интервалы, возраст и литологический состав отложений
	Чк-4, 3075–3045 м. Возраст определен по (<i>Cloudina</i> ?): 3075,0–3071,0 м (4 м). Известняк с примесью тонкораспыленного черного битуминозного материала; 3071,0–3072,0 м (1 м). Гравелито-брекчия доломитовой породы; 3070–3067 м (3 м). Известняк черный битуминозный, переслаивающийся с доломитовой породой; *3067–3064 м (3 м). Брекчия и брекчированная доломитовая средне-мелкозернистая порода; 3064–3061 м (3 м). Известняк тонкозернистый слоистый; 3061–3051 м – керна нет; 3051–3049 м (2 м). Брекчия черной и белой доломитовой породы; 3049–3045 м (4 м). Известняк черный тонкозернистый
	Чк-17, инт. 3081–3028 м. Возраст определен по фауне <i>Korilophyton</i> sp.: 3047,0–3030,0 м (17 м). Брекчия и конгломерато-брекчия доломитовой породы серого и темно-серого до черного цвета с прослоем (инт. 3046–3045 м) глинистой светло-зеленовато-серой породы
	Чк-501, 3300–2908 м. Возраст определен по фауне <i>Namacalathus</i> , <i>Korilophyton</i> , <i>Renalcis</i> , <i>Cloudina</i> , <i>Namacalathus</i> : 3000–2964 м (36 м) доломитовая порода с прослоями кремнисто-доломитового состава (снизу вверх конгломерато-брекчии сменяются небрекчированными породами); инт. 2964–2938 м (26 м) доломитовая конгломерато-брекчия и доломитовая порода
	Чк-26, 3100–2987 м. Возраст определен по фауне <i>Renalcisgranosus</i> : Интервал 3100–2987 м (113 м). Доломитовая порода с преобладанием доломитовых брекчий с прослоями кремнисто-глинистых пород (по эффузивам). Вскрыт контакт с вышележащими отложениями, представленными (инт. 2977–2917 м (60 м). Переслаивание черных сланцев, доломитовой породы и доломитовой брекчии с телами измененных метаандезитов и туфолавы андезитов

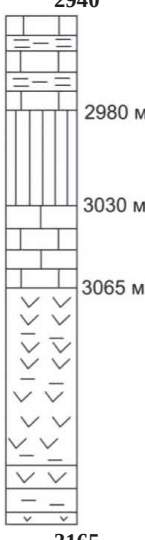
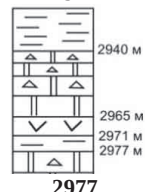
*Подчеркнуты породы в интервалах, по которым определен возраст отложений.

Сопоставление райгинской свиты венда и «Чкаловской» толщи

Для отложений райгинской свиты в разрезе скважины Восток-3 характерно накопление ритмически построенных пачек, нижняя часть которых сложена известняками с прослоями песчаников, алевролитов и аргиллитов, вверх по разрезу отмечен переход в тонкозернистые известняки.

Наблюдается определенная ритмичность и в строении «чкаловской толщи». В разрезе скважины 10 отмечено чередование прослоев известняков (прослой 2–8 м, суммарная мощность по скважине 26 м) и аргиллитов (прослой 3–14 м суммарная мощность по керну 23 м), при отсутствии керна на 76 м разреза скважины. Разрез насыщен измененными магматическими породами, которые могли произвести некоторое воздействие на вмещающие осадочные породы, в том числе и к тектоническому дроблению. Наблюдать какие-либо контакты пород не удалось вследствие сильной раздробленности керна.

Таблица 3. Скважины, вскрывшие разрез «чкаловской толщи» на территории Чкаловской площади

Колонка (м)	Скважина, интервалы, возраст и литологический состав отложений
	Чк-10, 3160–2940 м. Возраст определен по фауне <i>Korilophyton</i> sp.: инт. 3160–3065 м (95 м) эффузивные породы с *прослоями черных сланцев (аргиллитов); 3065–3030 м (35 м) известняки темно-серые до черных; 3030–2980 м – керна нет; 2980–2940 м (40 м) Черные сланцы с 4–6 метровыми прослоями известняков темно-серых до черных. Суммарная мощность известняков составляет 26 м, а аргиллитов – 23 м.
	Чк-26, 2977–2925 м. Выделены по литологическим данным: инт. 2977–2917 м (60 м) Переслаивание черных сланцев, доломитовой породы и доломитовой брекчии с телами измененных метаандезитов и туфолавы андезитов

*Подчеркнуты породы в интервалах, по которым определен возраст отложений.

Таким образом, «чкаловская» толща, перекрывающая котоджинскую свиту, сложена переслаиванием темно-серых, до черных, аргиллитов (сланцев) с известняками (скв. 10) либо черных сланцев с доломитовой породой, с прослоями доло-

митовых брекчий, и с телами метаандезитов и туфолов андезитового состава (скв. 26). В разрезе скважины 2 толща установлена условно и сложена известняками темно-серыми милонитизированными, мраморизованными, доломитизированными окварцованными.

Для райгинской свиты отмечено ритмическое строение отложений. В Востоковском типе разреза ритмы представлены в нижней части: обломочными известняками с прослоями терригенных пород, переходящими к верхним частям ритмов в тонко-обломочные известняки. На сопредельной площади в Вездеходном типе разреза развиты строматолитовые доломиты и доломитизированные известняки. Для Чкаловского типа разреза установлено как ритмическое чередование известняков и аргиллитов (аналог ритмов Востоковского типа разреза), так и переслаивание аргиллитов с доломитами, содержащими прослой доломитовых брекчий (аналог Вездеходного типа разреза).

Условия формирования вендских отложений

В результате проведенных исследований установлено, что вендские отложения на территории юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы представлены тремя типами разрезов (табл. 4). При детальном анализе литологических особенностей пород венда возможна следующая реконструкция обстановок осадконакопления.

Самые древние строматолитово-доломитовые с прослоями песчаников породы венда (пойгинская свита) изучены только в разрезе скважины Восток-3. Однако не исключено распространение этих от-

ложений на всей изученной территории. Их формирование проходило в мелководной обстановке шельфа, вблизи континента.

Отложения котоджинской свиты с *Namacalathus* установлены в Востоковском (скважина Восток-3) и Чкаловском типах разреза, в Вездеходном типе разреза фациальные аналоги котоджинской свиты не встречены. Однако, учитывая, что возраст верхней части вездеходной толщи в разрезе скважины Вездеходной-4 условно датируется ранним кембрием, можно предположить, что в венде на Вездеходном участке шло длительное накопление доломитов начиная с интервала пойгинско-котоджинского времени венда, вплоть до завершения формирования на сопредельной территории чурбигинской и пайдугинской свит нижнего-среднего кембрия (востоковский тип разреза, скважины Восток-1 и Восток-3). Аналоги раннекембрийских пород установлены авторами [6, 7] на территории Чкаловской площади (скважины 9 и 210). Вышеизложенные материалы позволяют предположить широкое распространение массивных доломитов с реликтовой строматолитовой структурой (карбонатная платформа?) с условным центром на территории Вездеходной площади. На протяжении раннего кембрия режим карбонатного осадконакопления постепенно менялся с сокращением площади карбонатной платформы.

Таким образом, в пределах Вездеходного и Нюрольского СФР в начале позднего венда началось накопление доломитов пойгинской свиты (район скважины Восток-3), сменившееся во времени накоплением доломитов с прослоями доломитовых

Таблица 4. Литологический состав отложений венда и нижнего-среднего кембрия Нюрольского и Вездеходного СФР (свита, возраст, литология)

Чкаловские	Вездеходная 4	В*-3	В-1
Є ₁₋₂ (пока бурением не установлены)	Вездеходная, V-Є ₁₋₂ Массивные доломиты, частью строматолитовые, микрофитолитовые, доломитистые аргиллиты, линзы туфов, тела спилитов, спессартитов и габбро-базальтов	Пайдугинская, Є ₁₋₂ Карбонатно-глинисто-кремнистые породы с пиритом, прослой силицитов	Пайдугинская, Є ₁ Черные с ОБ карбонатно-глинистые породы с пиритом, прослой кислых тефроидов
Аналог Чурбигинской, Є ₁₋₂ Чк-210, Чк-9, Чк-2 Известняки, участками доломитизированные, брекчированные, прослой доломитов. В подошве черные аргиллиты		Чурбигинская, Є ₁₋₂ известняки, глинисто-карбонатные породы, черные аргиллиты с пиритом, линзы кремней (ОБ до 25 %). Выше – нодулярные известняки, глинистые породы	Чурбигинская, Є ₁ Верхняя часть – переслаивание пелитоморфных известняков и карбонатно-глинистых, алевроглинистых пород со сгустками кремнезема
«Чкаловская», V ₃ Чк-10, Чк-26, Чк-210, Чк-2, Чк-9 известняки и аргиллиты, переходящие в аргиллиты, прослой доломитовых брекчий		Райгинская, V ₃ rg Ритмы. Обломочные известняки с прослоями терригенных пород, переходящие вверх в тонкообломочные известняки	?
Котоджинская, V ₃ Чк-4, Чк-17, Чк-501, Чк-26, Чк-2 Доломиты и доломитовые конгломерато-брекчии, прослой кремней		Котоджинская, V ₃ kt, переслаивание доларенитов и доломитовой породы с прослойками кремней	?
?	?	Пойгинская, V ₃ pg Доломиты, частью пластово-строматолитовые, доларенитовые, пелитоморфные	?

брекчий (котоджинская свита, скважина Восток-3, Чкаловские 4, 17, 26, 501, 2?) (рис. 4). Возможно, и базальная часть строматолитовых доломитов вездеходной толщи сформировалась в близкое к этому время. К концу венда (райгинская свита, «чкаловская» толща) накопление доломитов по изученным материалам продолжилось на части Вездеходной и Чкаловской площадей (Вездеходные скважины 3, 4, Чкаловская скважина 26), но прекратилось на территории с Востокским типом разреза (скважина Восток-3). В райгинское время здесь начали накапливаться карбонатно-терригенные осадки. В Нюрольском СФР (Чкаловская площадь) в райгинское время происходит формирование черных аргиллитов, переслаивающихся с известняками (возрастной аналог райгинской свиты, скважина Чкаловская-10). В непосредственной близости (Чкаловская-26) накапливались аргиллиты, сменяемые вверх по разрезу доломитами и доломитовыми брекчиями (возможный аналог вездеходной толщи), которые подвергались седиментационному размыту с формированием прослоев обломочных доломитов. Возможно, в дальнейшем подтвердиться и высказанное нами предположение, что встреченные в разрезе скважины Чкаловская-2 известняки (без прослоев аргиллитов) являются не только возрастным, но и фациальным аналогом райгинской свиты.

Таким образом, территория длительного накопления доломитов (Вездеходная площадь), оконтуривается по периферии с востока и с запада зоной формирования известняков. В конце вездеходного времени (ранний кембрий) площадь накопления доломитов существенно уменьшилась. Тем не менее, за венд-раннекембрийский интервал времени мог сформироваться значительный массив доломитовых образований протяженностью от Вездеходной до Чкаловской площади (рис. 4).

Выводы

1. Вендские отложения прослежены в юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы на территории Вездеходного и Нюрольского СФР.
2. Отложения венда на территории юго-востока Западно-Сибирской геосинеклизы представлены строматолитовыми доломитами. Вверх по разрезу и по периферии они постепенно заме-

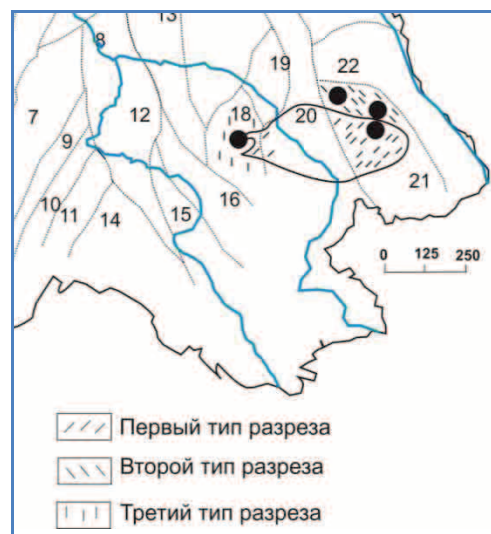


Рис. 4. Три типа разрезов, установленных в вендских отложениях Западно-Сибирской геосинеклизы: 1) Вездеходный, представленный доломитами перекристаллизованными с прослоями строматолитовых доломитов; 2) Востокский, представленный доломитами, переходящими вверх по разрезу в циклиты, сложенные преимущественно известняками, содержащими прослои песчаников, алевролитов и аргиллитов в подошвах ритмов; 3) Чкаловский, представлен доломитами, переходящими вверх по разрезу в известняки с прослоями аргиллитов, переходящими по простиранию в аргиллиты, приуроченные к телам измененных магматических пород, в подошве аргиллитов с прослоями доломитовых конгломератобрекчий, аналогичных Вездеходному типу разреза. Второй тип разреза соответствует карбонатной платформе. Наименования СФР см. на рис. 1

щаются известняками и аргиллитами. В конце раннего кембрия накопление доломитовых осадков завершилось.

3. Осадочные доломиты карбонатной платформы, существовавшей в венде – раннем кембрии на территории от Вездеходного до Нюрольского СФР, являются перспективным объектом для поиска месторождения нефти и газа.

Работа выполнена при поддержке Интеграционного проекта СО РАН и УрО РАН № 50 «Геологическое строение, тектоника, история формирования и перспективы нефтегазоносности палеозоя Западно-Сибирской геосинеклизы и ее складчатого обрамления».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Решения межведомственного совещания по рассмотрению и принятию региональной стратиграфической схемы палеозойских образований Западно-Сибирской равнины / под ред. В.И. Краснова. – Новосибирск: СНИИГТИМС, 1999. – 80 с.
2. Елкин Е.А., Краснов В.И., Бахарев Н.К. и др. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Палеозой Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2001. – 163 с.
3. Геологическое строение доюрского основания Западно-Сибирской плиты в пределах Кетъ-Тымского междуречья / Г.Д. Исаев, С.Н. Макаренко, М.Е. Раабен, В.И. Виджаков, И.И. Коптев. – Новосибирск, 2003. – 34 с.
4. Разрез переходных венд-кембрийских отложений восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы (по результатам бурения параметрической скважины Восток-3) / А.Э. Конторович, А.И. Варламов, Д.В. Гражданкин, Г.А. Карлова, А.Г. Клец, В.А. Конторович, С.В. Сараев, А.А. Терлеев, С.Ю. Беляев, И.В. Варакина, А.С. Ефимов, Б.Б. Кочнев, К.Е. Наговицин, А.А. Постников, Ю.Ф. Филиппов // Геология и геофизика. – 2008. – № 12. – С. 1238–1247.
5. Новые биостратиграфические данные по осадочным образованиям «домезозойского» фундамента Западно-Сибирской геосинеклизы в северо-западной части Томской области (материалы параметрической скважины Чкаловская-501) / А.А. Терлеев, Д.А. Токарев, Н.В. Сенников, А.Е. Ковешников, С.Н. Мака-

- ренко // Фундамент, структуры обрамления Западно-Сибирского мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна, их геодинамическая эволюция и проблемы нефтегазоносности: Матер. II Всеросс. науч. конф. с участием иностранных ученых. – Тюмень; Новосибирск, 2010. – С. 159–161.
6. New paleontological data from the Upper Vendian of the Chkalovskoe Territory of the Fore-Yenisei segment of the West Siberian Megabasin (boreholes 10, 17, 26, 501) / A.A. Terleev, D.A. Tokarev, V.A. Kontorovich, S.N. Makarenko, A.E. Koveshnikov, N.V. Sennikov, G.M. Tatianin // Neoproterozoic sedimentary basins: stratigraphy, geodynamics and petroleum potential: Proc. of the International conference. – Novosibirsk, 30 July – 02 August, 2011. – Novosibirsk: IPGG SB RAS, 2011. – P. 100–102.
 7. Палеонтологические данные венд-кембрийских отложений Чкаловской площади в северо-западной части Томской области по результатам бурения (скв. Чкаловская № 10, 17, 26, 501, 210, 9, 4) / А.А. Терлеев, Д.А. Токарев, В.А. Конторович, Н.В. Сенников, А.Е. Ковешников, С.Н. Макаренко, Г.М. Татьяна // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Матер. совещания. Вып. 10. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 17–20 октября 2012. – Т. 2. – С. 117–119.
 8. Новый терригенно-вулканогенный разрез кембрия и положение западной границы Сибирской платформы (по материалам параметрического бурения на Вездеходной площади, Томская область) / А.Э. Конторович, С.В. Сараев, А.Ю. Казанский, В.А. Каштанов, В.А. Конторович, В.А. Пономарчук, В.М. Тищенко, Ю.Ф. Филиппов // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. – № 7. – С. 1022–1031.
 9. Стратиграфия кембрия в комплексе основания Приенисейской части Западно-Сибирского мегабассейна (по результатам бурения параметрической скважины Восток-1) / А.И. Варламов, И.В. Коровников, А.С. Ефимов, А.Г. Клец, А.В. Комаров, А.Э. Конторович, В.А. Конторович, С.В. Сараев, Ю.Ф. Филиппов, И.В. Варакин, В.Н. Глинских, В.А. Лучинина, Н.В. Новожилова, Т.В. Пегель, Н.В. Сенников, А.В. Тимохин // Фундамент, структуры обрамления Западно-Сибирского мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна, их геодинамическая эволюция и проблемы нефтегазоносности: Матер. I Всеросс. науч. конф. с участием иностранных ученых. – Тюмень-Новосибирск, 2008. – С. 38–41.
 10. Тумаев И.В. Литология венд-нижнекембрийских отложений Предьенисейской нефтегазоносной субпровинции (по результатам бурения параметрических скважин Восток-1, 3, 4) // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 99–104

Поступила 03.10.2013 г.

UDC 553.984;552.54

LITHOLOGY AND FEATURES OF VENDIAN DEPOSITS FORMATION IN THE SOUTH-EASTERN PART OF WEST-SIBERIAN GEOSYNECLISE

Aleksandr E. Koveshnikov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk branch, Russia, 634055, Tomsk, Akademicheskaya avenue, 3. E-mail: sanika@tpu.ru.

Vladimir A. Kontorovich,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Russia, 630090, Novosibirsk, Akademika Koptyuga Avenue, 3. E-mail: KontorovichVA@ipgg.sbras.ru.

Svetlana N. Makarenko,

Cand. Sc., Tomsk State University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 36. E-mail: s.makarenko@ggf.tsu.ru.

Gennady M. Tatyani,

Cand. Sc., Tomsk State University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 36. E-mail: gmt@mail.tsu.ru.

Aleksandr A. Terleev,

Cand. Sc., Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, 630090, Novosibirsk, Akademika Koptyuga Avenue, 3. E-mail: Terleevaa@ipgg.sbras.ru

Dmitry A. Tokarev,

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, 630090, Novosibirsk, Akademika Koptyuga Avenue, 3. E-mail: Tokarevda@ipgg.sbras.ru.

In recent years on the territory of the South-Eastern part of West-Siberian geosyncline the distribution of Vendian deposits was determined at significantly greater territory than it was considered before. In this regard, the study of the conditions of Vendian formations accumulation becomes relevant because of possible association of oil and gas deposits to them. The aim of the research is to study the peculiarities of lithological composition of deposits based on the study of the faunal remnants and fair determination of Vendian deposits existence, and to identify the features of distribution of certain lithological type of rocks by the area of their distribution using the method of paleogeographic reconstructions. As a result, and based on the earlier analysis of the tectonic structure of the South-Eastern part of West-Siberian geosyncline the authors have determined the widespread propagation of sedimentary Dolomites and limestones of the Vendian period of pure carbonate without admixture of terrigenous material composition. They are traced not only within Vezdekhodny and Tiysky structural-facial areas, as it was known before, but on the territory of Nurolsky and obviously Kolpashevsky structural-facial areas as well. It allows making conclusion on the existence of carbonate platform on the vast territory with the center near the Vezdekhodnaya ground. Its deposits become potentially hydrocarbon bearing at wide development of secondary transformation. The corresponding complex of works could promote the discover of new oil and gas fields in the Precambrian carbonate rocks.

Key words:

Pre-Cambrian carbonate rocks, Wend, Western-Siberian geosyncline, carbonate platform.

REFERENCES

1. *Resheniya mezhdovedstvennogo soveshchaniya po rassmotreniyu i prinyatiyu regionalnoy stratigraficheskoy skhemy paleozoyskikh obrazovaniy Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Decision of Interdepartmental meeting on considering and accepting the stratigraphic scheme of Paleozoic formations in Western-Siberian Plain]. Ed. by V.I. Krasnov. Novosibirsk, SNIIGGIMS, 1999. 80 p.
2. Elkin E.A., Krasnov V.I., Bakharev N.K. *Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Paleozoy Zapadnoy Sibiri* [Stratigraphy of oil and gas bearing basins in Siberia. Paleozoic of western Siberia]. Novosibirsk, GEO, SO RAN Publ., 2001. 163 p.
3. Isaev G.D., Makarenko S.N., Raaben M.E., Bidzhakov V.I., Koptev I.I. *Geologicheskoe stroenie doyruskogo osnovaniya Zapadno-Sibirskoy plity v predelakh Ket-Tymskogo mezhdurechya* [Geological structure of pre-Jurassic base of Western-Siberian Plane within the frames of Ket-Tymsk interfluvies area]. Novosibirsk, NGU Publ., 2003. 34 p.
4. Kontorovich A.E., Varlamov A.I., Grazhdankin D.V., Karlova G.A., Klets A.G., Kontorovich V.A., Saraev S.V., Terleev A.A., Belyaev S.Yu., Varaksina I.V., Efimov A.S., Kochnev B.B., Nagovitsin K.E., Postnikov A.A., Filippov Yu.F. *Razrez perekhodnykh vend-kembriyskikh otlozheniy vostochnoy chasti Zapadno-Sibirskoy geosineklizy (po rezul'tatam bureniya parametricheskoy skvazhiny Vostok-3)* [Section of intermediate Wend-Cambrian deposits in east part of Western-Siberian geosyncline (by the results of drilling the parametric well Vostok-3)]. *Geologiya i geofizika*, 2008, no. 12, pp. 1238–1247.
5. Terleev A.A., Tokarev D.A., Sennikov N.V., Koveshnikov A.E., Makarenko S.N. *Novye biostratigraficheskie dannye po osadochnym obrazovaniyam «domezozoyetskogo» fundamenta Zapadno-Sibirskoy geosineklizy v severo-zapadnoy chasti Tomskoy oblasti (materialy parametricheskoy skvazhiny Chkalovskaya-501)* [New biostratigraphic data on sediment formations «pre-Mesozoic» base of Western-Siberian geosyncline in north-east part of Tomsk region (materials of parametric well Chkalovskaya-501)]. *Fundament, struktury obramleniya Zapadno-Sibirskogo mezozoyско-kaynozoyского osadochnogo basseyna, ikh geodinamicheskaya evolyutsiya i problemy neftegazonosnosti. Materialy II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s uchastiem inostrannykh uchenykh* [Base, structure, framing of western-Siberian Mesozoic-Cenozoic deposit basin, their geodynamic evolution and problems of oil and gas bearing. Proc. II All-Russian scientific conference with foreign scientists participation]. Tyumen; Novosibirsk, 2010. pp. 159–161.
6. Terleev A.A., Tokarev D.A., Kontorovich V.A., Makarenko S.N., Koveshnikov A.E., Sennikov N.V., Tatyani G.M. *New paleontological data from the Upper Vendian of the Chkalovskoe Territory of the Fore-Yenisei segment of the West Siberian Megabasin (boreholes 10, 17, 26, 501). Neoproterozoic sedimentary basins: stratigraphy, geodynamics and petroleum potential: Proc. of the International conference. Novosibirsk, 30 July – 02 August, 2011. Novosibirsk, IPGG SB RAS, 2011. pp. 100–102.*
7. Terleev A.A., Tokarev D.A., Kontorovich V.A., Sennikov N.V., Koveshnikov A.E., Makarenko S.N., Tatyani G.M. *Paleontologicheskie dannye vend-kembriyskikh otlozheniy Chkalovskoy ploshchadi v severo-zapadnoy chasti Tomskoy oblasti po rezul'tatam bureniya (skv. Chkalovskaya № 10, 17, 26, 501, 210, 9, 4)* [Paleontological data of Wend-Cambrian deposits in Chkalovskaya ground in north-west part of Tomsk region by the results of drilling wells Chkalovskaya № 10, 17, 26, 501, 210, 9, 4]. *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Centralno-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu). Materialy Soveshchaniya* [Geodynamic evolution of lithosphere of Central Asian mobile belt (from ocean to the continent)]. Irkutsk, 17–20 October 2012. Iss. 10, vol. 2, pp. 117–119.
8. Kontorovich A.E., Saraev S.V., Kazansky A.Yu., Kashtanov V.A., Kontorovich V.A., Ponomarchuk V.A., Tishchenko V.M., Yu.F. Filippov. *Novy terrigenno-vulkanogennoy razrez kembriya i polozhenie zapadnoy granitsy Sibirskoy platformy (po materialam parametricheskoy bureniya na Vezdekhodnoy ploshchadi, Tomskaya oblast)* [New terrigenous volcanic section of Cambrian period and the position of western border of Siberian platform (by the materials of parametric drilling on Vezdekhodnaya ground, Tomsk region)]. *Geologiya i geofizika*, 1999, vol. 40, no. 7, pp. 1022–1031.
9. Varlamov A.I., Korovnikov I.V., Efimov A.S., Klets A.G., Komarov A.V., Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Saraev S.V., Filippov Yu.F., Varaksin I.V., Glinskikh V.N., Luchina V.A., Novozhilova N.V., Pegel T.V., Sennikov N.V., Timokhin A.V. *Stratigrafiya kembriya v komplekse osnovaniya Prieniseyskoy chaste: Zapadno-Sibirskogo megabasseyna (po rezul'tatam bureniya parametricheskoy skvazhiny Vostok-1)* [Stratigraphy of Cambrian period in the base complex of Yenisei region in Western-Siberian mega basin (by the results of drilling the parametric well Vostok-1)]. *Fundament, struktury obramleniya Zapadno-Sibirskogo mezozoyско-kaynozoyского osadochnogo basseyna, ikh geodinamicheskaya evolyutsiya i problemy neftegazonosnosti. Materialy I Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s uchastiem inostrannykh uchenykh* [Base, structure, framing of western-Siberian Mesozoic-Cenozoic deposit basin, their geodynamic evolution and problems of oil and gas bearing. Proc. II All-Russian scientific conference with foreign scientists participation]. Tyumen; Novosibirsk, 2008. pp. 38–41.
10. Tumashev I.V. *Litologiya vend-nizhnnekembriyskikh otlozheniy Predyeniseyskoy neftegazonosnoy subprovintsiy (po rezul'tatam bureniya parametricheskikh skvazhin Vostok-1, 3, 4)* [Lithology of Wend-Low Cambrian deposits of Yenisei region oil and gas bearing subprovince (by the results of drilling the parametric wells Vostok-1, 3, 4)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 99–104.

УДК 553.98;550.4;571.12

ГЕОХИМИЧЕСКОЕ И ЛИТОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ «ГЛАВНОГО ИСТОЧНИКА» ДОЮРСКИХ ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ КРАСНОЛЕНИНСКОГО СВОДА (ТЮМЕНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Кузина Марина Яковлевна,

преподаватель кафедры геологии Института природопользования
Югорского государственного университета,
Россия, 628012, Тюменская область, ХМАО-Югра,
г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16. E-mail: m_kuzina@ugrasu.ru

Коржов Юрий Владимирович,

канд. хим. наук, доцент кафедры геологии Института природопользования
Югорского государственного университета,
Россия, 628012, Тюменская область, ХМАО-Югра,
г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16. E-mail: ykor1962@mail.ru

Исаев Валерий Иванович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геофизики Института
природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: isaevvi@tpu.ru

Генезис залежей нефти доюрского комплекса Западной Сибири является предметом острых дискуссий. Общеизвестно, что принимаемая концепция «главного источника» углеводородов в доюрских залежах определяет стратегию их поисков. Выполнено обоснование концепции «главного источника» на основе системного анализа геохимических и литолого-петрографических данных. Послойно изучен керновый материал из апт-сеноманского, средне- и верхнеюрского комплексов и доюрского осадочно-вулканогенного образования продуктивной и непродуктивной скважин Северо-Рогожниковского и Рогожниковского месторождений Краснотенского свода. Литолого-петрографические особенности пород изучались в прозрачных и прокрашенных смолой шлифах методом оптической микроскопии. Геохимическими исследованиями установлены содержание в породе и молекулярно-массовый состав подвижных углеводородов нефтяного ряда, по направленности их изменения выявлена направленность межпластовой миграции. В разрезе юрско-триасового возраста выявлены две вертикальные зоны межпластовой миграции углеводородов. Первая – в пределах верхнеюрских отложений, вторая – в пределах среднеюрских и верха триасовых пород. Формирование залежей нефти в триасовом комплексе происходило в верхних частях эффузивных массивов, в зоне развития трещиноватости и гидротермальной проработки. Залежи нефти в триасовых коллекторах сформированы в результате поступления углеводородов из низов тюменской свиты. Результаты совместного анализа геохимических и литолого-петрофизических данных по Северо-Рогожниковскому и Рогожниковскому месторождениям обосновывают концепцию юрского источника углеводородов залежей доюрского основания.

Ключевые слова:

Доюрский комплекс, литология, углеводороды, миграция, генезис нефти, Краснотенский свод.

Введение

В работах [1, 2] исследованы содержание, состав ароматических углеводородов и алканов меловых, юрских и доюрских комплексов Северо-Рогожниковского и Рогожниковского месторождений Краснотенского свода. Выявленная направленность вертикальной межпластовой миграции углеводородов показала юрский генезис нефтей залежей доюрского комплекса.

Генезис залежей доюрского комплекса до сих пор остается предметом острых дискуссий. Вместе с тем общепризнано, что принимаемая концепция «главного источника» углеводородов в доюрских залежах определяет стратегию их поисков. Поэтому в настоящей работе продолжено обоснование концепции «главного источника» на основе системного анализа геохимических и литолого-петрографических данных.

Краткая характеристика методики исследований

Изучение литолого-петрографического состава и выявление перемещения УВ-флюидов от «источника» (материнских пород, залежи) в вышележащие и нижележащие отложения выполнено на основе детального послойного изучения продуктивных, над- и подпродуктивных отложений, вскрытых разведочными скважинами (рис. 1).

Изучался керновый материал продуктивной Северо-Рогожниковской скважины 765 (20 образцов из средне- и верхнеюрского, апт-сеноманского комплексов и триасового осадочно-вулканогенного образования) и непродуктивной Рогожниковской скважины 718 (8 образцов апт-сеноманского комплекса и триасовых отложений).

Детальное макроскопическое описание керна позволило получить предварительные сведения о составе и генезисе, фильтрационно-емкостных

свойствах пород. *Литолого-петрографические особенности* пород изучались в прозрачных и прокрашенных смолой шлифах методом оптической микроскопии с помощью поляризационного микроскопа ПОЛАМ Л-213М. Для *геохимических исследований* навеску образца 40–50 г дважды экстрагировали смесью н-гексан: хлороформ (80:20 об. %). Из объединенного экстракта на анализ отбирали аликвоту, которую концентрировали до 1 мл. Анализ экстрактов проведен на хромато-масс-спектрометре фирмы PerkinElmer Clarus 500MS. Такая методика исследования [1] позволяет установить в породе содержание и молекулярно-массовый состав подвижных углеводородов нефтяного ряда, выявить по направленности их изменения направленность межпластовой миграции.

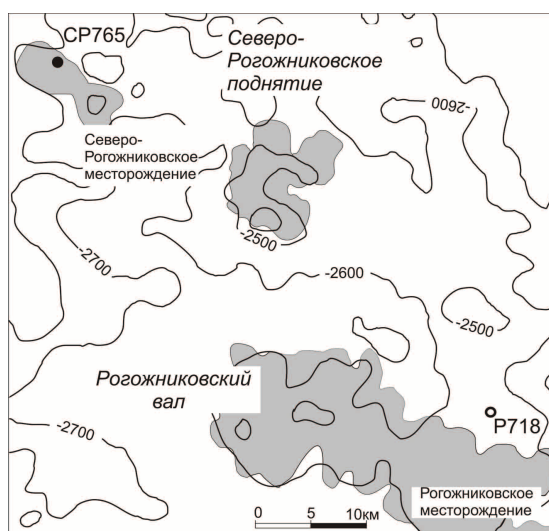


Рис. 1. Положение залежей в отложениях триаса Северо-Рогожниковского и Рогожниковского месторождений и исследуемых скважин на схематической структурной карте кровли доюрских отложений

Породы доюрского комплекса Рогожниковской площади

На рис. 2, 3 приведены литолого-стратиграфические разрезы юрского и доюрского комплексов скважины СР765 и триасового комплекса скважины Р718, соответственно. Рисунки включают фотографии исследуемых образцов керна скважин. На рис. 4 приводятся фотографии и описание шлифов керна.

В целом выход керна из кровельной части триасового комплекса в скважине СР765 низкий, подняты только отдельные куски пород (рис. 2). На образцах видны следы залеченных трещин. Подобные изменения в породах связываются с зонами тектонического дробления (околотрещинный метасоматоз). Вниз по разрезу скважины СР765, с глубины 2895 м и ниже, трещиноватые породы сменяются плотными массивными эффузивами первоначально, вероятно, дацитового состава, но сильно изменёнными, карбонатизированными, хлоритизированными, пелитизированными.

В скважине СР765 наибольший интерес с точки зрения нефтеносности доюрского основания представляет интервал (2759...2794 м), где получены промышленные притоки нефти. Здесь вскрыта 100-метровая зона вулканитов триаса.

На рис. 4, а–в приводится шлиф образца СР765–1ф, отобранного в скважине СР765 с глубины 2769,8 м. Порода представляет собой интенсивно преобразованный порфирит. Вкрапленники (рис. 4, а, б) размером 1...3 мм, первоначально представленные калиевым полевым шпатом, нацело замещены, в основном каолинитом. Также по полевым шпатам развиваются хлорит, эпидот, гидроокислы железа. Рудный минерал находится в виде мелкой вкрапленности в основной массе или образует зёрна размером до 0,5 мм. Вторичные минералы выполняют пространство породы не полностью, в местах замещения вкрапленников есть поры и пустоты размерами до 0,5 мм. Они составляют до 1 % объема породы. Основная масса (рис. 4, в) породы, сложенная игольчатыми микрокристаллами плагиоклаза и вулканическим стеклом, замещена агрегатом хлорита, глинистых минералов, иллита с гидроокислами железа, пелитоморфным карбонатом.

В шлифах (рис. 4, а–в) видно, что породы в значительной степени измененные. Установить точно их первоначальный состав трудно, но, судя по сохранившимся реликтовым структурам и форме замещенных минералов, их можно отнести к кислым эффузивам. Видно, что породы подверглись метасоматозу и последующей гидротермальной проработке, выразившейся в каолинитизации, хлоритизации, гематитизации и в меньшей степени – карбонатизации. Присутствуют характерные для низкотемпературных метасоматических изменений минералы: альбит, хлорит, эпидот. Наложённым процессом, возможно связанным с более поздней трещиноватостью, следует считать образование пелитоморфного кальцита (карбонатизацию).

Триасовый комплекс в скважине Р718 также сложен кислыми эффузивами (рис. 3). На всем протяжении разреза породы однотипные, плотные, массивные. Наиболее характерным можно считать образец Р718ф4 с глубины 2908,6 м. На рис. 4 представлены фотографии шлифа керна. Это сильно изменённая эффузивная порода кислого состава (дацит). Основная масса, сложенная лейстами плагиоклаза, микролитами кварца и вулканическим стеклом, почти полностью замещена хлоритом, глинистыми минералами и карбонатом (рис. 4, з). Порфировые вкрапленники темнокрасного минерала размером 0,5...1,0 мм замещены хлоритом, порфировые вкрапленники калиевого полевого шпата размером до 3 мм корродированы с образованием карбоната и хлорита (рис. 4, д, е). Рудный минерал находится в виде мелких зёрен в основной массе, а также выделяется в виде скоплений размером до 0,5 мм в зоне замещения тёмнокрасных минералов.

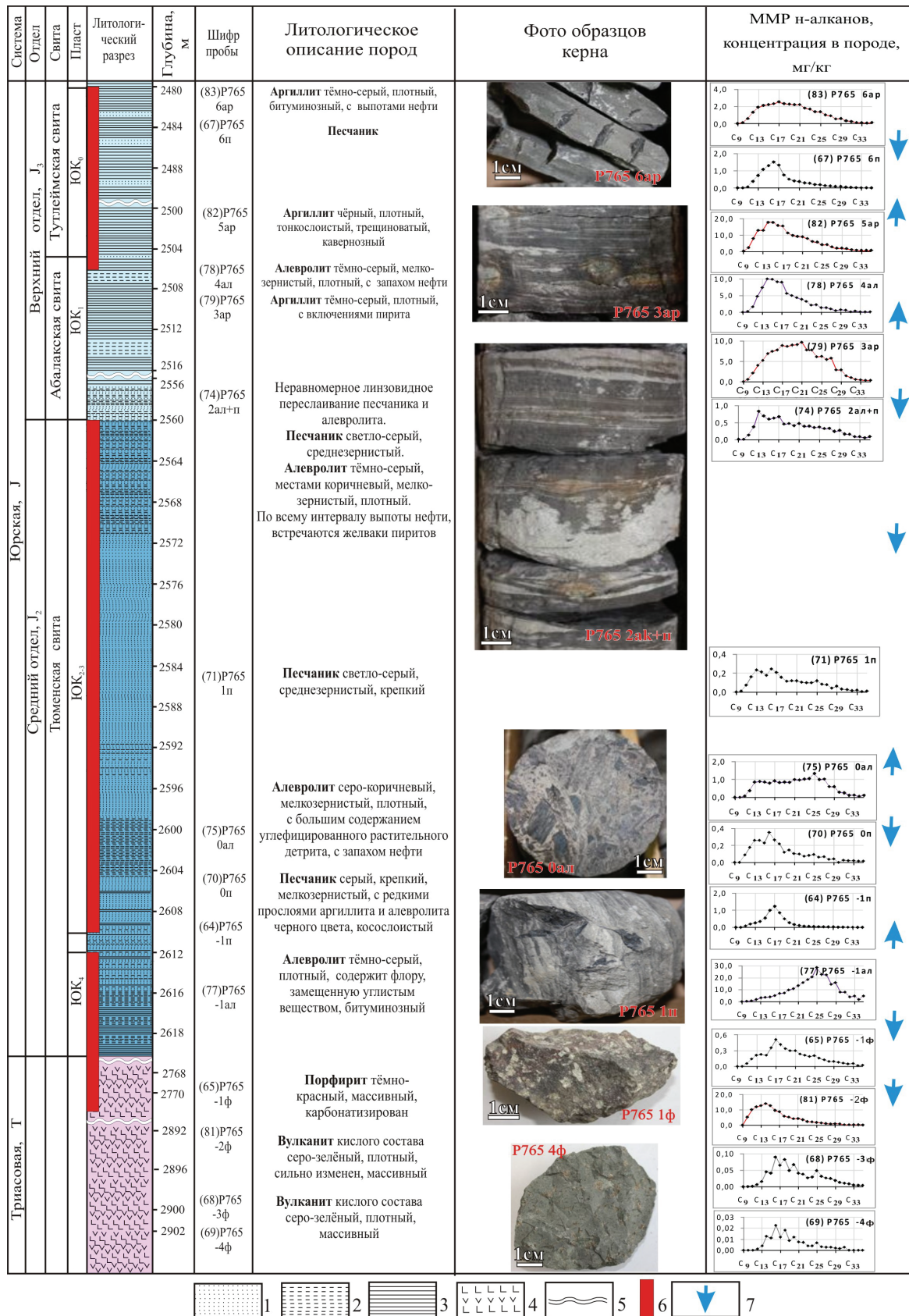


Рис. 2. Литология пород и распределение алкановых углеводородов в разрезе юрских и триасовых отложений скважины Северо-Рогожниковская 765: 1) песчаник; 2) алевролит; 3) аргиллит; 4) породы фундамента; 5) отсутствие керна; 6) нефтетепровлавление; 7) вероятное направление миграции УВ

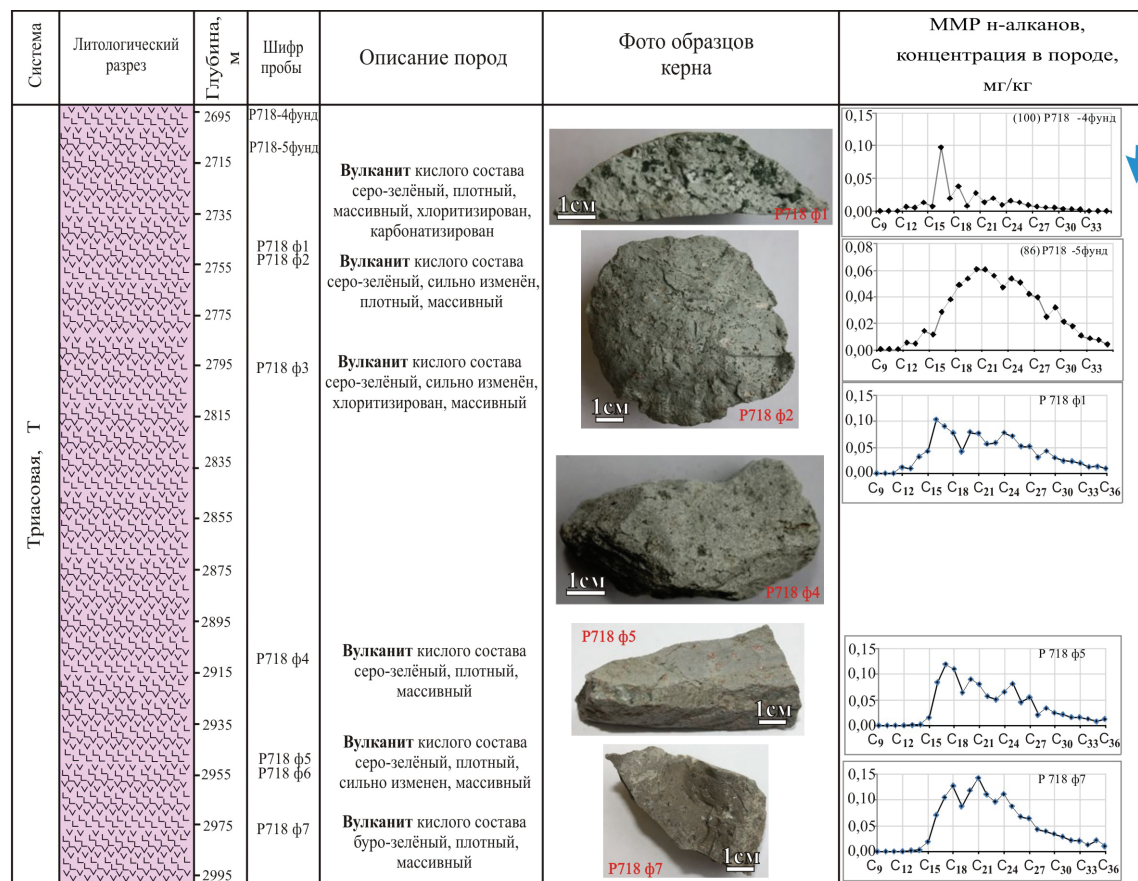


Рис. 3. Описание пород и распределение алкановых углеводородов в разрезе триасового комплекса скважины Рогожниковская 718. Условные обозначения те же, что на рис. 2

Системный анализ геохимических и литолого-петрофизических данных

В таблице приведены данные по содержанию в образцах пород суммы экстрагированных органических веществ (ОВ) и идентифицированных веществ: н-алканов C₉–C₄₀, изопrenoидных алканов C₁₃–C₂₀. В таблице также приведены некоторые расчетные параметры, позволяющие рассмотреть изменение состава алканов как результат межслойной фильтрации. На рис. 2, 3 приводятся выявленные в породах юрского и триасового комплексов молекулярно-массовые распределения (ММР).

Данные показывают, что в пределах контура нефтеносности (скв. СР765) основные количества органического вещества и углеводородов сконцентрированы в верхнеюрском, среднеюрском и в кровле триасового комплекса пород. С глубиной, вулканогенные породы туринской серии триаса резко обедняются по ОВ, достигая «условно фоновых» концентраций 50...57 мг/кг, установленных в образцах непродуктивной скважины Р718.

По показателю обстановки осадконакопления П/Ф верхнеюрские, среднеюрские и триасовые комплексы формировались в различных окислительно-восстановительных условиях. В абалакско-тутлейском комплексе значения этого показате-

ля варьируют в пределах 0,8...1,7, резко меняясь при переходе к среднеюрским отложениям, достигая в глинизированных слоях 3,8...5,6, а затем опять уменьшаясь в триасовых породах до значений 1,1...0,4.

Массообмен между верхней и нижней частями рассматриваемого разреза определяется литологическими свойствами пород. Так, глины низов абалакской свиты мощностью 20...30 м выступают эффективным экраном восходящих и нисходящих фильтрационных перетоков. В результате (рис. 2) абалакско-тутлейский комплекс оказывается практически изолированным нефтеносным объектом – источником нефтяных УВ для вышележащих отложений, вплоть до хантыманийской свиты [1].

В среднеюрских слоях выделяется образец алевролита (77) СР765-1ал, проявляющий способность к нефтеотдаче, содержащий 1741,3 мг/кг породы экстрагируемых ОВ. От него вверх, в слою песчаника, перемещается вещество с высоким показателем П/Ф. От этого же образца вниз на протяжении 130 м триасового разреза наблюдается уменьшение П/Ф, стремясь к значениям, характерным для условно фоновых образцов скважины Р718.

Нисходящее перемещение ОВ из среднеюрского в триасовый комплекс затруднено из-за высо-

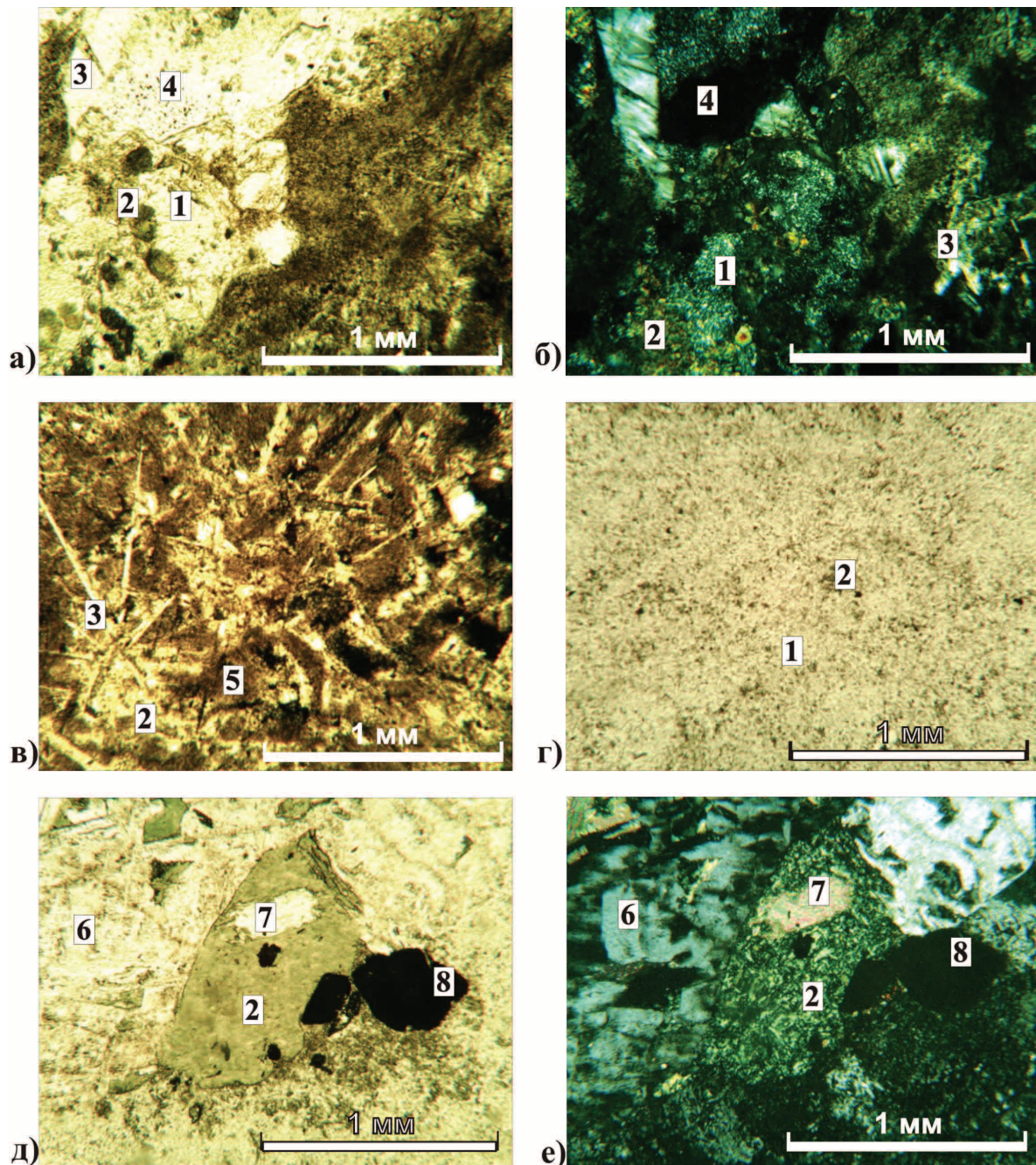


Рис. 4. Шлиф образца CP765-1ф (а, б, в), скважина 765 Северо-Рогожниковская, глубина 2769,80 м: а) порфировый вкрапленник нацело замещён каолинитом (1), агрегатом хлорита и эпидота (2), альбитом (3), часть пространства не заполнена, есть пустоты (4). Николи ||; б) то же в скрещенных николях; в) основная масса породы, сложенная игольчатыми микролитами плагиоклаза (3) и вулканическим стеклом, почти полностью замещена агрегатом хлорита (2), глинистых минералов, гидроокислов железа (5) и карбонатом. Николи ||.

Шлиф образца P718ф4 (г, д, е), скважина 718 Рогожниковская, глубина 2908,60 м: г) основная масса, сложенная лейстами плагиоклаза, микролитами кварца и вулканическим стеклом, нацело замещена хлоритом (2), глинистыми минералами (1) и карбонатом. Николи ||; д) порфировый вкрапленник калиевого полевого шпата (6) замещён хлоритом (2), карбонатом (7), рудным минералом (8). Николи ||; е) то же в скрещенных николях

кой плотности триасовых вулканитов, но все же происходит. Углеводороды с высоким значением П/Ф проникают в нижележащие более плотные вулканиты, со значительным накоплением в приконтактной зоне – образец (81) CP765-2ф. Петрографические данные, например образец (65)

CP765-1ф (рис. 4), указывают на вероятность гидротермальной проработки кровли триасового комплекса и за счет этого на облегчение массопереноса УВ. Ниже по разрезу концентрации ОБ резко падают до фоновых значений, отмеченных в скважине P718.

Таблица. Характеристика органического вещества исследованного керна глубоких скважин [2]

Шифр образца породы	Интервал отбора, м	Свита, пласт (стратон)	Сумма экстрагированных веществ, мг/кг	Содержание в породе, мг/кг (хромато-масс-спектрометрия)			Параметр состава алканов**	
				н-алканов C ₉ –C ₄₀	изопрен-алканов C ₁₅ –C ₂₀	ΣAr*	K _i	П/Ф
Площадь Северо-Рогожниковская, скв. 765								
(83) CP765 6ар	2480,3	tl (J ₃)	204,29	32,730	1,505	1,340	0,13	1,71
(67) CP765 6п	2480,1	tl (J ₃)	80,29	9,873	1,490	0,538	0,29	1,63
(82) CP765 5ар	2502,0	ab (J ₃)	5353,50	187,566	32,507	41,176	0,58	0,83
(78) CP765 4ал	2506,1	ab (J ₃)	2746,47	84,255	23,177	10,535	0,86	0,96
(79) CP765 3ар	2507,0	ab (J ₃)	644,54	129,283	4,380	4,566	0,11	1,48
(74) CP765 ал+п	2563...2565	tm, ЮК ₃₋₄ (J ₂)	116,45	8,955	0,981	3,528	0,61	3,85
(71) CP765 1п	2585,0	tm, ЮК ₃₋₄ (J ₂)	55,17	2,657	0,325	0,637	0,47	1,64
(75) CP765 0ал	2600,0	tm, ЮК ₃₋₄ (J ₂)	128,62	16,998	1,013	3,593	0,27	3,62
(70) CP765 0п	2605,0	tm, ЮК ₃₋₄ (J ₂)	88,83	2,908	0,583	0,791	0,75	2,20
(64) CP765-1п	2610,3	tm, ЮК ₃₋₄ (J ₂)	93,85	5,958	2,112	0,735	0,72	4,46
(77) CP765-1ал	2616,5	tm, ЮК ₃₋₄ (J ₂)	1741,30	254,530	12,183	9,374	0,64	5,63
(65) CP765-2ф	2769,0	(Т)	78,46	4,614	0,649	0,162	0,49	1,04
(81) CP765-3ф	2892,1	(Т)	3014,90	120,831	16,626	49,762	0,48	1,00
(68) CP765-3ф	2900,8	(Т)	177,09	0,800	0,134	0,031	0,54	0,78
(69) CP765-4ф	2903,0	(Т)	16,14	0,145	0,033	0,002	0,57	0,58
Площадь Рогожниковская, скв. 718								
(100) P718-4ф	2695,5	(Т)	57,11	0,325	0,030	0,005	0,36	0,50
(86) P718-5ф	2707,0	(Т)	54,72	0,742	0,079	0,020	0,70	0,41

*Сумма идентифицированных ароматических УВ, включая н-алкилбензолы C₈–C₃₄, нафталины C₁₀–C₁₂, фенантрены C₁₄–C₁₅ [3].

**Геохимические параметры состава алканов [4]: П/Ф – пристан/фитан – параметр обстановки осадконакопления; K_i=(iC₁₉+iC₂₀)/(nC₁₇+nC₁₈) – показатель источника органического вещества и обстановки осадконакопления.

Молекулярно-массовый состав н-алканов дополняет представленную картину межпластовой миграции ОВ (рис. 2). Алевролит тюменских отложений CP765-1ал характеризуется широким (нефтяным) распределением н-алканов C₉–C₃₄₋₃₆, с максимумом на C₂₄₋₂₉. Для этого образца характерна потеря значительной доли легких гомологов C₉₋₂₁. В соседних с ним вышележащих образцах песчаника фиксируются только легкие гомологи C₉₋₂₁. Эти легкие мигрирующие УВ, узнаваемые по максимуму на C₁₆₋₁₇, можно проследить вверх по юрскому разрезу на расстояние около 100 м, до абалакских глин, и в нижележащие порфиры коры выветривания – до 200...300 м. Нисходящие легкие углеводороды C₉₋₂₁ накапливаются в верхних слоях плотных вулканитов фундамента (образец (81) CP765-3ф) и глубже в своей массе не проникают. В указанных пределах, как по геохимическим, так и по литолого-петрографическим данным, может быть выделен *единый в генетическом отношении нефтеносный интервал, включающий среднеюрские отложения и верха триаса*.

В плотные вулканиты, расположенные ниже 2900 м, углеводороды из юрских отложений не проникают. Здесь в продуктивной скважине CP765 наблюдается фоновое содержание органических веществ, ММР алканов сходное с битумоидом непродуктивной скважины P718.

Выводы

1. В разрезе пород юрско-триасового возраста Северо-Рогожниковского и Рогожниковского месторождений по данным геохимических и литолого-петрографических исследований выявляются две вертикальные зоны межпластовой миграции углеводородов. Первая – в пределах верхнеюрских отложений, вторая – в пределах среднеюрских и верха триасовых пород.
2. Формирование залежей нефти в триасовом комплексе в пределах месторождений происходило в верхних частях эффузивных массивов, в зоне развития трещиноватости и активной гидротермальной проработки.
3. Залежи нефти в триасовых коллекторах сформированы в результате поступления углеводородов из низов тюменской свиты.
4. Результаты системного анализа геохимических и литолого-петрофизических данных по Северо-Рогожниковскому и Рогожниковскому месторождениям подтверждают концепцию юрского источника углеводородов залежей доюрского основания.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, по проекту в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы», ГК № 14.515.11.0073.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жильцова А.А., Исаев В.И., Коржов Ю.В. Вертикальная геохимическая зональность нефтегазовых комплексов (на примере Рогожниковского и Северо-Рогожниковского месторождений) // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 1. – С. 69–82.
2. Генезис доюрских залежей нефти Рогожниковской группы месторождений (по результатам изучения вертикальной зональности алканов) / Ю.В. Коржов, В.И. Исаев, М.Я. Кузина, Г.А. Лобова // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 51–56.

3. Распределение ароматических углеводородов в разрезе отложений нефтегазовых комплексов (на примере месторождений Краснотенского свода) / Ю.В. Коржов, В.И. Исаев, А.А. Жильцова, О.В. Латыпова // Геофизический журнал. – 2013. – Т. 35. – № 1. – С. 113–129.
4. Гончаров И.В. Геохимия нефтей Западной Сибири. – М.: Недра, 1987. – 179 с.

Поступила 02.09.2013 г.

UDC 553.98;550.4;571.12

GEOCHEMICAL AND LITHOLOGICAL JUSTIFICATION OF «THE MAIN SOURCE» CONCEPT OF PRE-JURASSIC OIL DEPOSITS IN KRASNOLENINSK ARCH (TYUMEN REGION)

Marina Ya. Kuzina,

Yugra State University, Russia, 628012, Khanty-Mansiysk, Chekhova street, 16.

E-mail: m_kuzina@ugrasu.ru.

Yury V. Korzhov,

Cand. Sc., Yugra State University, Russia, 628012, Khanty-Mansiysk,

Chekhova street, 16. E-mail: ykor1962@mail.ru.

Valery I. Isaev,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: isaevvi@tpu.ru.

Genesis of oil deposits of pre-Jurassic complex in Western Siberia is a subject of heated debates. It is conventional that the accepted concept of «the main source» of hydrocarbons in pre-Jurassic deposits defines the strategy of their searches. The authors have justified «the main source» concept on the basis of the system analysis of geochemical and lithologic and petrographic data. The core material from Apt-Senoman, Middle and Upper Jurassic complexes and pre-Jurassic sedimentary-igneous formations of productive and unproductive wells of North Rogozhnikovskoye and Rogozhnikovskoye fields of the Krasnoleninsk arch was studied layer-by-layer. Lithologic and petrographic features of rocks were studied in transparent sections and in those painted over with resin by the method of optical microscopy. The content in rock and molecular-mass composition of mobile hydrocarbons of oil row were determined by geochemical researches. The authors determined the interstratal migration direction by their change orientation. In a section of Jurassic and Triassic age two vertical zones of intersheeted migration of hydrocarbons were revealed. The first is within the Upper-Jurassic deposits, the second is within Middle-Jurassic and top of the Triassic beds. Oil deposits were formed in Triassic complex in upper parts of effusive massifs, in fracturing and hydrothermal rearing areas. Oil deposits in Triassic collectors were formed as a result of hydrocarbon intake from bottoms of the Tyumen suite. The results of the joint analysis of geochemical and lithological and petrophysical data on North Rogozhnikovskoye and Rogozhnikovskoye fields prove the concept of the Jurassic source of hydrocarbons of pre-Jurassic basis deposits.

Key words:

Pre-Jurassic complex, lithology, hydrocarbons, migration, oil genesis, Krasnoleninsk arch.

REFERENCES

1. Zhiltsova A.A., Isaev V.I., Korzhov Yu.V. Vertikalnaya geokhimicheskaya zonalnost neftegazonosnykh kompleksov (na primere Rogozhnikovskogo i Severo-Rogozhnikovskogo mestorozhdeniy) [Vertical geochemical zonality of oil-and-gas-bearing complexes (by the example of Rogozhnikovskoe and Severo-Rogozhnikovskoe fields)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 1, pp. 69–82.
2. Korzhov Yu.V., Isaev V.I., Kuzina M.Ya., Lobova G.A. Genезis doyrskikh zalezhey nefti Rogozhnikovskoy gruppy mestorozhdeniy (po rezul'tatam izucheniya vertikalnoy zonalnosti alkanov) [Genesis of pre-Jurassic oil deposits of Rogozhnikovskaya

group of fields (by the results of investigation of alkanes vertical zonality)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 51–56.

3. Korzhov Yu.V., Isaev V.I., Zhiltsova A.A., Latypova O.V. Raspredelenie aromaticeskikh uglevodorodov v razreze otlozheniy neftegazonosnykh kompleksov (na primere mestorozhdeniy Krasnoleninskogo svoda) [Distribution of aromatic hydrocarbons in deposit section of oil-and-gas-bearing complexes (by the example of Krasnoleninsky arch fields)]. *Geofizicheskiy zhurnal*, 2013, vol. 35, no. 1, pp. 113–129.
4. Goncharov I.V. *Geokhimiya neftey Zapadnoy Sibiri* [Geochemistry of oils of Western Siberia]. Moscow, Nedra, 1987. 179 p.

Геология и полезные ископаемые

УДК 553.411.04/071(571.5)

ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МЕЗОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА. Ч. 3. ПЕТРОХИМИЧЕСКИЙ И ГЕОХИМИЧЕСКИЙ КРИТЕРИИ

Кучеренко Игорь Васильевич,

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геологии и разведки
полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: Kucherenko.o@sibmail.com

Актуальность работы определяется сохраняющейся в рудной геологии после столетних исследований необходимостью создания теории образования гидротермальных месторождений золота взамен существующих конкурирующих между собой гранитогенной, базальтогенной, метаморфогенной, полигенной гипотез рудообразования.

Цель исследования: петролого-геохимическое в сравнительном аспекте изучение рудовмещающих метасоматических ореолов в месторождениях золота, образованных в кристаллическом субстрате и толщах черных сланцев, на предмет доказательства их вещественно-генетической однородности или различий в условиях образования месторождений той и другой совокупности; разработка на основе полученных результатов петрохимического и уточнение геохимического прогнозно-поисковых критериев оценки территорий на золото.

Методика исследования: полевое изучение рудовмещающих метасоматических ореолов и отбор проб в ореолах и породах обрамления, диагностика метасоматических минералов, полный химический силикатный и атомно-абсорбционный на золото, серебро, ртуть анализы проб горных пород, петрохимические пересчеты по объемно-атомному методу химических анализов горных пород, балансовые расчеты с целью количественной оценки миграции и фиксации петрогенных компонентов в процессах метасоматизма и рудообразования, расчеты статистических параметров распределения металлов в метасоматических ореолах и вмещающих ореолы породах для реконструкции геологической истории рудогенных элементов.

Результаты: доказываемая геолого-вещественно-генетическая однородность оруденения, образованного в той и другой среде, и принадлежность околорудных метасоматических ореолов к сочетанию метасоматических формаций – березитовой в тыловых зонах и пропилитовой в периферийных. Формирование контрастных аномалий ассоциации фемофильных элементов в составе K, Ti, P, Mg, Fe, Ca, Mn в тыловых зонах ореолов в обрамлении глубинных разломов в сочетании со снижением содержаний Ti и P по мере удаления от разломов до кларковых уровней вследствие инверсии щелочного режима растворов в кислотный и перехода элементов в инертное состояние открывает возможности использования явления фемофильной специализации золотоносных березитов для доказательства генерации металлоносных растворов в очагах умеренно щелочных базальтовых расплавов. В качестве петрохимического прогнозно-поискового критерия эти факты обеспечивают положительный прогноз, диагностику раствороподводящих разломов, контролирующих размещение месторождений через раствороподводящую функцию, и локализацию площадей для поисков оруденения, в том числе не выходящего на дневную поверхность. В результате реконструкции по специальной методике геологической истории металлов в околорудном пространстве изученных месторождений диагностированы субкларковые их содержания, в частности, золота на уровне 0,5...3,0 мг/т в различных кристаллических породах и в черных сланцах вне и на дальней периферии околорудных метасоматических ореолов; параметры распределения повышенных и аномальных концентраций металлов прямо коррелируют с интенсивностью околорудных метасоматических преобразований пород. Эти данные доказывают образование месторождений в не специализированном на золото субстрате, включая черные сланцы, и синрудный статус геохимических аномалий.

На положительный прогноз по совокупности обсуждаемых и других ранее предложенных автором тектонического, геодинамического, петрологического критериев прогнозно-поискового комплекса в отличие от существующих популярных представлений не влияет уровень (кларковый, сверхкларковый) дорудной золотоносности черных сланцев.

Ключевые слова:

Мезотермальные месторождения золота, прогнозно-поисковый комплекс, кристаллический субстрат, черные сланцы, петрохимический, геохимический критерии.

Введение

В петролого-геохимической модели рудовмещающего гидротермально измененного субстрата мезотермальных месторождений золота южного горно-складчатого обрамления Сибирского кратона, которая приведена и обсуждается в [1], показана полная аутентичность минералого-петрохимической зональности околорудных метасоматических ореолов, образованных в разнообразных кристаллических породах и толщах черных сланцев, а также принадлежность ореолов к сочетающимся метасоматическим формациям – березитовой в тыловых и пропиловитовой в периферийных минералого-петрохимических зонах.

В свою очередь, во всех вмещающих месторождения средах распределение рудогенных элементов в околорудном пространстве на сверхкларковых уровнях прямо коррелирует с минералого-петрохимической зональностью околорудных метасоматических ореолов. Результаты петролого-геохимического исследования использованы для уточнения одного из ключевых положений теории метасоматической зональности Д.С. Коржинского [2], разработки нового петрохимического и корректировки геохимического прогнозно-поисковых критериев оценки территорий на золотое оруденение.

Петрохимический критерий

Основные достигнутые научные результаты, использованные для разработки критерия, заключаются в следующем.

Типовая универсальная метасоматическая колонка, приложимая к кристаллическому и черносланцевому субстрату, включает следующие минералого-петрохимические зоны (подчеркнуты минералы, исчезающие в более тыловой зоне).

Фронтальная зона:	Кварц + серицит + лейкоксен + рутил + магнетит ± пирит ± кальцит + альбит ± кероген ± хлориты ± цоизит ± <u>актинолит</u> ± <u>тремолит</u>
Хлоритовая (эпидотовая, эпидот-хлоритовая) зона:	Кварц + серицит + лейкоксен + рутил + магнетит + пирит ± кальцит ± доломит + альбит ± кероген ± <u>хлориты</u> ± <u>цоизит</u> ± <u>клиноцоизит</u> ± <u>эпидот</u>
Альбитовая зона:	Кварц + серицит + лейкоксен + рутил + магнетит + пирит ± кальцит ± доломит-анкерит ± сидерит ± апатит ± кероген + <u>альбит</u>
Тыловая зона:	Кварц + серицит + лейкоксен + рутил + магнетит + пирит ± кальцит ± анкерит ± сидерит ± брейнерит ± апатит ± кероген

Балансовыми петрохимическими расчетами подтверждается образование березитов и березитовидов (березитов с альбитом в смежной с тыловой аль-

битовой минералого-петрохимической зоне) в условиях калиево-сернисто-углекислотного метасоматизма, сопровождаемого частичным (до 50 мас. %) выносом из исходных пород тыловых зон кремнезема, почти полной (до 90 мас. %) заменой натрия более сильным основанием калием и поступлением восстановленной серы и уголекислоты.

Основная масса поступающих по разломам с металлоносными растворами петрогенных компонентов и металлов, в том числе золота, серебра и других, фиксируется в минералах тыловых зон и в абсолютном выражении регулируется диффузионным механизмом массопереноса [3]. Изменения минерального состава пород в периферийных фронтальной и промежуточной хлоритовой минералого-петрохимических зонах пропиловитов осуществляются в основном посредством перераспределения петрогенных компонентов из исходных минералов в новообразованные, то есть за счет внутренних ресурсов пород, при том что этих зон достигает из тыловых, как правило, и незначительное количество наиболее подвижных серы, уголекислоты, а также металлов.

Согласно теории [2], метасоматическая зональность околорудных метасоматических ореолов формируется вследствие последовательного перехода в подвижное состояние химических элементов от одной минералого-петрохимической зоны к другой по мере усиления метасоматических преобразований пород в направлении к тыловой зоне. При этом в каждой более тыловой зоне сравнительно со смежной более фронтальной число минеральных фаз уменьшается на единицу. Это всегда фиксируется в природных колонках: новообразованные во фронтальной зоне актинолит или тремолит полностью растворяются на ее внутренней границе, хлорит или эпидот замещаются на внутренней границе хлоритовой (эпидотовой) зоны, альбит замещается на внутренней границе альбитовой зоны. Однако березит в тыловой и кварцевая жила в осевой зонах остаются полиминеральными, равно как и метасоматит в смежной альбитовой зоне, состоящий не из двух, как предписано теорией, а из большего числа минералов.

Представляется, что это различие между теоретической и природной метасоматическими колонками обусловлено не предусмотренным и не учитываемым теорией поступлением в формирующиеся метасоматические ореолы химических элементов и их соединений с металлоносными растворами извне. Основная масса поступающих компонентов, как отмечалось, оседает в тыловой и смежной альбитовой зонах, то есть в ближнем обрамлении раствороподводящих каналов и их конечном минеральном выполнении – жилах, что естественно в условиях диффузионного механизма массопереноса, доказываемого эмпирическими данными [3].

В рудовмещающих толщах черных сланцев полнопроявленная минералого-петрохимическая зональность околорудных ореолов с березитом в тыловой зоне формируется эпизодически. Доста-

точно редко березиты можно встретить в минерализованных зонах и залежах прожилково-вкрапленных руд, приуроченных, помимо тыловой березитовой, к альбитовой и хлоритовой зонам рудовмещающих метасоматических ореолов. Обычно породы в экзоконтактах крупных промышленных золотоносных кварцевых жил и мелких прожилков представлены черными сланцами, измененными на уровне альбитовой, промежуточной хлоритовой или даже фронтальной зон. Вместе с тем соседние промышленные золотоносные жилы или минерализованные зоны, локализованные в гранитах или ультраметаморфитах одного с рудными телами в черных сланцах месторождения и одного с ними возраста, то есть образованные в результате одного рудообразующего процесса, всегда обрамлены околорудными метасоматическими ореолами полного профиля с березитом в тыловой зоне. Следовательно, дефицит березитов в рудовмещающих черных сланцах обусловлен специфическим достоверно пока не установленным влиянием черносланцевой среды на взаимодействие растворов с породами, но не принципиальными различиями в геолого-генетической сущности процессов образования рудных тел и околорудных метасоматитов в кристаллических породах и черносланцевых толщах. Этот факт следует иметь в виду, поскольку дефицит или отсутствие березитов в рудовмещающих толщах черных сланцев используется сторонниками метаморфогенно-гидротермальной и полигенной концепций [4–6 и др.] как основание для противопоставления по геолого-генетическим показателям месторождений золота, образованных в том и другом субстрате.

Давно доказано, что региональный метаморфизм гидратации на так называемом регрессивном этапе представляет метасоматический процесс, реализуемый в одних термодинамических режимах с березит-пропилитовым метасоматическим процессом. При этом Петрографическим кодексом предписано термином «метаморфизм» обозначать только изохимический эндогенный процесс преобразования горных пород, производным которого не свойственна локальная метасоматическая зональность – неперенная черта околорудных метасоматических ореолов. Сторонники метаморфогенно-гидротермальной концепции образования золоторудных месторождений в черных сланцах предпочитают идентифицировать минеральные зоны апочерносланцевых рудовмещающих метасоматических ореолов березит-пропилитового профиля с хлорит-биотитовой, хлорит-альбитовой, альбит-серицитовой и другими «субфациями регрессивного регионального метаморфизма» [7], что не корректно и вносит путаницу – одни и те же минеральные новообразования обозначаются разными терминами. Предпочтительное использование словосочетания «минеральная зона околорудного метасоматического ореола» определяется метасоматическим происхождением околорудно измененных черных сланцев.

Обогащение элементами феофильной ассоциации (P, Ti, Mg, Fe, Ca, Mn, K) тыловых минералого-петрохимических зон околорудных (рудовмещающих) метасоматических ореолов, образованных в кристаллическом субстрате и толщах черных сланцев, в обрамлении рудоконтролирующих глубинных разломов до уровней аномалий высокой контрастности (таблица) в сочетании со снижением по мере удаления от рудоконтролирующих глубинных разломов синхронно с промышленными параметрами руд аномальных концентраций титана (рисунок) и фосфора до кларковых уровней – факты, имеющие многоплановое теоретическое и прикладное значение.

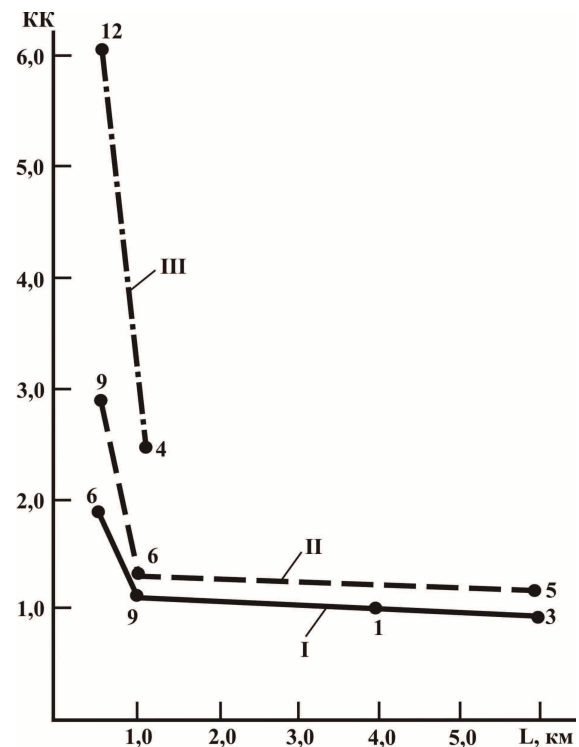


Рисунок. Изменение коэффициента концентрации титана (КК) в золотоносных апогнейсовых (I), апофелизитовых (II) березитах и апокальцифированных листовых (III) тыловых зон околорудных метасоматических ореолов Ирокиндинского рудного поля на разных расстояниях (L) от глубинного разлома. Цифры около фигуративных точек – число проб

В теоретическом плане они доказывают:

- прямую по глубинным разломам связь верхнекорковых блоков рудообразования с мантией;
- генерацию металлоносных растворов в мантийных очагах базальтовых расплавов;
- подвижность (миграционную способность) считающихся инертными при всех условиях [2] титана и фосфора – геохимических и металлогенических «близнецов» на путях подъема растворов и переход их в инертное состояние на уровнях рудоотложения;
- раствороподводящую функцию глубинных разломов, определяющую их рудоконтролирующую роль;

Таблица. Баланс (вынос-, привнос, в процентах) петрогенных элементов в зональных околорудных метасоматических ореолах мезотермальных золотых месторождений южной Сибири

Минеральная зона, подзона	Химические элементы													Δ
	Si	Al	K	Na	S ⁻	C _o	Ca	Mg	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Ti	P	Mn	
1. Месторождение Ирокинда														
1.1. Гранит мигматитовой выплавки, AR (3)														
By (5)	0	0	-10	-10	+	20	20	0	0	10	10	50	-60	1,2
Bi (6)	0	0	-10	0	+	220	70	30	30	70	20	110	0	3,1
X (9)	-10	10	-40	40	0	500	70	60	0	60	-10	210	-50	6,9
A (8)	0	0	-20	-10	+	870	10	60	20	50	70	250	10	4,5
Bn (7)	-10	10	20	-90	+	2400	200	220	100	230	250	650	30	18,8
1.2. Фельзитовый микрогранит-порфир, PZ ₃ (2)														
X (4)	-10	10	10	0	-60	140	120	180	170	60	280	190	210	12,6
A (6)	-30	10	70	-50	20	300	240	330	330	80	500	310	330	27,0
Bn (6)	-30	20	160	-90	1900	390	350	390	210	450	520	230	360	36,8
2. Кедровское месторождение														
2.1. Альмандин-двуслюдной плагиогнейс, PZ ₃ (1)														
By (1)	-2	2,8	66	-55	-49	-48	-14	10	44	37	-12	143	-27	7,0
X (1)	-4	8,4	14	-21	160	-27	36	-48	22	35	10	68	-35	6,0
Bn (1)	-48	-46	27	-96	2140	1330	716	439	65	61	98	653	42	45,0
2.2. Кварцевый диорит, гранодиорит, PZ ₃ (6)														
X (16)	0	0	0	0	1010	940	0	0	0	-10	0	0	10	4,0
A (6)	-10	-10	20	-10	3170	2070	30	50	60	-30	90	50	40	12,0
Bn (1)	-50	-20	40	-80	4270	4700	220	240	170	320	170	160	240	41,0
Углеродистые полевошпат-кварцевые сланцы кедровской свиты, R ₃														
2.3. Метаалевропесчаник (1)														
A (1)	-17	4,9	248	-34	+	1905	33	1053	282	340	82	300	374	18,0
Bn (1)	-39	8,8	445	-93	+	6913	880	1781	447	125	73	672	347	43,0
3. Месторождение Чертово Копыто														
Углеродистые полевошпат-кварцевые сланцы михайловской свиты, PR ₁														
3.1. Крупнозернистый метаалевролит (5)														
Y (2)	0	0	0	-10	-30	-10	50	20	0	30	10	0	0	2,9
X (8)	-20	-30	-30	-70	120	1400	1180	100	70	10	540	840	560	29,7
Bn (1)	-40	-30	-10	-90	0	2800	1920	170	30	-90	570	900	2110	43,4
3.2. Мелкозернистый метапесчаник (5)														
Y (1)	0	0	-30	80	180	40	30	10	0	-20	30	-30	100	3,5
Y (3)	0	10	-20	10	130	100	80	120	30	70	20	0	150	6,5
X (6)	-40	0	-20	-70	430	1910	1400	330	160	30	820	890	1750	34,9
Bn (1)	-30	-10	-10	-90	10	1980	1260	260	110	180	790	870	3620	32,5
3.3. Разнозернистый метапесчаник (1)														
Y (1)	0	0	70	-70	1130	10	-40	110	60	90	30	-50	0	7,94
X (4)	-30	-10	0	-85	1640	1370	510	420	240	80	840	450	600	31,4
Bn (1)	-50	-30	-10	-90	6570	3180	1300	690	250	490	490	640	4600	55,6

Примечание: 1) Минеральные зоны и подзоны околорудных метасоматических ореолов: Ву, Ви – подзоны умеренного и интенсивного изменения фронтальной зоны, У, Х, А, Вн – соответственно углеродистая, хлоритовая, альбитовая, тыловая зоны. 2) S⁻ – сера сульфидная, C_o – углерод окисленный (карбонатный), «+» – привнос S при содержании ее в исходной породе ниже предела чувствительности анализа. 3) В скобках – число проб, участвующих в расчете средних. 4) Δ – удельная масса перемещенного (привнесенного и вынесенного) вещества в процентах к массе вещества исходных пород в стандартном геометрическом объеме 10000 Å³. 5) Полные химические силикатные анализы горных пород выполнены в Центральной лаборатории ПГО «Запсибгеология» и в Западно-Сибирском испытательном центре (г. Новокузнецк) под руководством И.А. Дубровской и Г.Н. Юминовой.

- геолого-вещественно-генетическую однородность месторождений золота, образованных в кристаллическом и черносланцевом субстрате. В прикладном плане в качестве петрохимического критерия контрастные аномалии фемофиль-

ных элементов обеспечивают положительный прогноз, возможность выделять из множества разломов раствороподводящие (и рудоконтролирующие), тем самым, в сочетании с другими критериями, локализовать площади для поисков.

Геохимический критерий

Распределение рудогенных элементов в околорудном пространстве золоторудных месторождений обеих совокупностей подчиняется околорудной метасоматической зональности [1]. Это выражается в следующем.

Во всех трех подзонах – слабого, умеренного, интенсивного изменения фронтальной минералого-петрохимической зоны околорудных метасоматических ореолов – содержание золота, серебра, геохимического и металлогенического спутника золота ртути [8–10], дисперсия распределения металлов в ультраметаморфических, магматических породах, углеродистых сланцах минимальны, и содержания их близки к кларковым значениям для соответствующих видов исходных пород, не затронутых гидротермальными изменениями этапа рудообразования. Усиление метасоматических преобразований пород внутри фронтальной зоны от подзоны слабого к подзоне интенсивного изменения не сопровождается возрастанием параметров распределения металлов, как и большинства петрогенных компонентов.

Содержания и дисперсия распределения металлов эпизодически и в основном незначительно возрастают в хлоритовой минералого-петрохимической зоне, увеличиваются в альбитовой и достигают максимальных значений в тыловой березитовой минералого-петрохимических зонах, то есть в направлении, обратном направлению околоразломной (околотрещинной) концентрационной диффузии, реконструированному балансовыми расчетами распределения петрогенных и рудогенных компонентов [3]. Согласно расчетам, масса диффундирующих соединений металлов, как и петрогенных компонентов, поступивших с металлоносными растворами в выполненные впоследствии рудами разломы, в ходе диффузии в соответствии с градиентами концентраций по мере удаления от трещинных растворов в поровые растворы вмещающих пород снижается от одной минералого-петрохимической зоны к другой, во фронтальной зоне – до нуля.

На примере позднерифейской мухтуной свиты черных сланцев, образованной в Ирокиндинском прогибе западного обрамления Муйского выступа архейского фундамента, можно видеть, что в толще, не содержащей промышленного оруденения, в зональном метасоматическом ореоле пропилит-березитового профиля содержание металлов и дисперсия их распределения в тыловых зонах находятся на субкларковых уровнях.

Таким образом, распределение металлов в околорудном (межрудном) пространстве во всех средах, независимо от состава и происхождения вмещающих руды пород, прямо коррелирует с интенсивностью метасоматических преобразований субстрата.

Содержания золота и серебра в тыловых зонах околорудных метасоматических ореолов соотносятся с золотоносностью рудных тел – кварцевых жил, минерализованных зон. В кварцево-жиль-

ном Ирокиндинском месторождении, например, березиты и березитоиды (березиты с альбитом) в обрамлении рудных столбов с золотоносностью на уровнях многих десятков г/т содержат металлы до десятков...сотен мг/т. Как правило, возрастают также содержания ртути (и других металлов). В обрамлении рудных тел с рядовыми содержаниями золота (граммы...многие граммы в тонне руды) золотоносность метасоматитов обычно не превышает многих мг/т, содержания серебра – многих десятков мг/т.

Корреляционные связи золота и серебра эпизодически фиксируются во всем объеме околорудных метасоматических ореолов и, как правило, усиливаются в тыловых зонах, корреляционные связи золота и ртути менее систематичны.

Значения Au/Ag- и Au/Hg-отношений в пропилитовых периферийных зонах околорудных метасоматических ореолов с менее выраженными сравнительно с тыловыми зонами метасоматическими преобразованиями пород отвечают различающимся на порядок содержаниям золота, с одной стороны, и серебра, ртути, с другой. Обычное, за редкими исключениями, приближение этих отношений в метасоматитах тыловых зон к значениям, свойственным рудным телам (0,5...1,5), означает поступление золота с металлоносными растворами в опережающих количествах сравнительно с другими металлами.

Аналитическими данными, полученными посредством использования принятых методов петролого-геохимических исследований, доказывается аутентичное приведенному распределение рудогенных элементов в околорудном пространстве месторождений Ленского района – Чертово Кoryто, Вернинском, Сухой Лог [11–14].

Геохимические данные также, наряду с другими, подтверждают геолого-вещественно-генетическую однородность месторождений, образованных в кристаллическом и черносланцевом субстрате. Геохимические аспекты однородности выражаются в следующем.

- Во всех средах околорудные геохимические ореолы занимают меньшие объемы сравнительно с околорудными метасоматическими.
- За пределами околорудных метасоматических ореолов и во фронтальной их зоне содержания золота и других металлов в кристаллических породах и регионально метаморфизованных в режиме нагревания с образованием мусковит-биотитового парагенезиса черных сланцев отражают региональные кларки для соответствующих петро- и литотипов пород или близки к ним.
- Повышенные в хлоритовой и высокие в тыловых альбитовой и березитовой минералого-петрохимических зонах околорудных метасоматических ореолов содержания металлов и другие параметры их распределения формировались в процессе рудообразования, то есть представляют следствие рудообразования.

- Во всех изученных месторождениях не обнаружено признаков «ступенчатого» накопления золота и других металлов. В каждом месторождении околорудный метасоматический, геохимический ореолы и руды образованы в результате одного, единого для всех производных рудообразующего процесса. Вероятно, количество золота, сосредоточенного в рудах каждого месторождения, определяется золотопродуцирующей способностью источника металлогенных растворов, условиями их подъема и концентрации металла в верхнекоревых блоках рудообразования.

Большинство изученных месторождений рядовые и крупные. В предлагаемом варианте геохимический критерий опирается на следующий из приведенных материалов противоположный популярным до сих пор представлениям о местных породных источниках золота [15–21 и др.] вывод, согласно которому промышленные месторождения золота образуются в любом, в том числе и, вероятно, в большинстве случаев, не специализированном до начала рудообразования субстрате, то есть с кларковыми (субкларковыми) содержаниями золота. Негативное заключение о перспективах анализируемой площади при отсутствии обогащенных до рудообразования золотом пород и без учета всего комплекса критериев было бы ошибочным.

Заключение

Эмпирическую основу прогнозно-поисковых критериев составляют факты, раскрывающие условия залегания золоторудных месторождений в золоторудных районах – пространственно-временные и причинно-следственные соотношения производных рудообразующих процессов – околорудных метасоматических, геохимических ореолов и руд с магматическими и метаморфическими комплексами, характеризующие минералого-химический состав, структуру и происхождение горных пород, минералого-петрохимическую зональность и формационную принадлежность околорудных метасоматических ореолов и распределение рудогенных элементов в околорудном пространстве месторождений. Большинство фактов поддается интерпретации с формулировкой выводов без вариантов, поэтому в полученные результаты не требуется вносить поправки и допуски, неизбежные в теоретических построениях и экспериментах и спо-

собные принципиально изменить выводы. Это, однако, не исключает корректировку и уточнение критериев по мере накопления новых данных.

Разработка эксклюзивной методологии петролого-геохимических исследований и использование следующих из нее методов обеспечило реконструкцию геологической истории петрогенных и рудогенных элементов во вмещающем месторождения разнообразном по составу, происхождению субстрате, диагностику кларковых (субкларковых) приобретенных горными породами при их образовании содержаний химических элементов и синрудного обогащения горных пород золотом и другими металлами.

Сравнительный анализ, сопутствующий интерпретации результатов, показал совершенную геолого-вещественно-генетическую однородность месторождений, образованных в кристаллических магматических, ультраметаморфических породах и толщах черных сланцев, тем самым продемонстрировал ошибочность противопоставления по условиям образования месторождений той и другой совокупности.

Все добытые факты, приведенные в [22, 23] и в данной статье, взаимно дополняя друг друга, образуют согласованный ансамбль, удовлетворительно описываются базальтогенной концепцией рудообразования в составе антидромных гранит-диорит-долеритовых флюидно-магматических комплексов. Концепция, как адекватная реальным рудообразующим процессам, составляет теоретическую и эмпирическую основу совокупности прогнозно-поисковых критериев мезотермального золотого оруденения, в равной степени приложимых к золоторудным районам южного горно-складчатого обрамления Сибирского кратона, сложенным кристаллическим субстратом и толщами черных сланцев. Два критерия – петрологический (магматический) и петрохимический – разработаны и предлагаются впервые.

Использование критериев комплекса раздельно и в совокупности возможно при выполнении геологических работ любых масштабов и назначения – ГДП-200, ГДП-50, при поисках, оценке, разведке месторождений золота.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию. ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы». Гос. контракт № П238 от 23.04.2010 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучеренко И.В. Петролого-геохимические свидетельства геолого-генетической однородности гидротермальных месторождений золота, образованных в черносланцевом и несланцевом субстрате // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 25–35.
2. Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. – М.: Наука, 1982. – 104 с.
3. Кучеренко И.В. Гидродинамика трещинно-поровых породно-флюидных взаимодействий и механизм массопереноса в процессах околотрещинного гидротермального метасоматизма // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 11. – С. 37–43.
4. Гаврилов А.М., Кряжев С.Г. Минералого-геохимические особенности руд месторождения Сухой Лог // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 8. – С. 3–16.
5. 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. 3–46.
6. Кряжев С.Г., Устинов В.И., Гриненко В.А. Особенности флюидного режима формирования золоторудного месторождения Сухой Лог по изотопно-геохимическим данным // Геохимия. – 2009. – № 10. – С. 1108–1117.
7. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных 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.
8. Озерова Н.А. Ртуть и эндогенное рудообразование. – М.: Наука, 1986. – 155 с.
9. Степанов В.А., Моисеенко В.Г. Геология золота, серебра и ртути. – Владивосток: Дальнаука, 1993. – 228 с.
10. Уникальная ассоциация природной амальгамы золота, киневари, самородных металлов и карбидов Фадеевского рудно-россыпного узла, Приморье / В.П. Молчанов, А.И. Ханчук, Е.И. Медведев, Л.П. Плюснина // Доклады РАН. – 2008. – Т. 422. – № 4. – С. 536–538.
11. Петролого-геохимические черты рудовмещающего метасоматического ореола золоторудного месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 1. – С. 11–20.
12. Геохимическая зональность рудовмещающего ореола мезотермального золоторудного месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) / Р.Ю. Гаврилов, И.В. Кучеренко, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 42–47.
13. 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.
14. Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в золоторудном месторождении Сухой Лог (Ленский район). Ч. 3. Геохимия золота и серебра / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 33–40.
15. Goldberg I.S. The formation of ores as self-organizational process of redistribution of metals // The 31-st International Geological Congress, Rio de Janeiro, Aug. 6–17, 2000: Congress Program. – Rio de Janeiro: Geol. Surv. Brasil, 2000. – P. 3771.
16. Metallogeny of gold deposits of China / Shao Jun, Hui De-feng, Kong Xiang-min, Shou Nai-wy // Geology and Resources. – 2004. – V. 13. – № 4. – P. 246–250.
17. Фридовский В.Ю., Гамянин Г.Н., Горячев Н.А. Геолого-генетическая модель формирования стратифицированных золото-кварцевых месторождений Южного Верхоянья // Отечественная геология. – 2006. – № 5. – С. 33–37.
18. 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, Robert Francois, L.V. Danyushevsky, Chang Zhaoshan // Economic Geology. – 2007. – V. 102. – № 7. – P. 1233–1267.
19. Meffre S., Large R.R., Scott R. et al. Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 2008. – V. 72. – P. 2377–2391.
20. Галямов А.Л. Золотоносные осадочные комплексы складчатого обрамления Сибирской платформы // Руды и металлы. – 2010. – № 1. – С. 28–37.
21. 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.
22. Кучеренко И.В. Прогнозно-поисковый комплекс для мезотермальных месторождений золота. Ч. 1. Тектонический и геодинамический критерии // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 1. – С. 19–27.
23. Кучеренко И.В. Прогнозно-поисковый комплекс для мезотермальных месторождений золота. Ч. 2. Петрологический критерий // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 114–122.

Поступила 22.10.2012 г.

UDC 553.411.04/071(571.5)

PROGNOSIS-SEARCH COMPLEX FOR MESOTHERMAL GOLD DEPOSITS. P. 3. PETROCHEMICAL AND GEOCHEMICAL CRITERIA

Igor V. Kucherenko,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue,
30. E-mail: Kucherenko.o@sibmail.com

The relevance of the work is defined by the necessity to develop after hundred-year investigations hydrothermal gold deposits formation theory instead of the four competing ones – granitogene, basaltogene, metamorphogene, polygene retaining in ore geology.

The aim of the study: petrologic-geochemical in comparative aspect investigation of the ore-containing metasomatic haloes in gold deposits formed in crystal substratum and black shale series to prove their material-genetic uniformity or differences in the conditions for forming deposits of both totality; the development on the basis of the obtain results of petrochemical criterion and definition of geochemical prognosis – research criterion for territory gold appraisal.

The methods used in the study is the field investigation of the ore-containing metasomatic haloes and testing rocks, determination of metasomatic minerals, total chemic silicate and atom-absorption on gold, silver, mercury and other elements analysis of rock samples, petrochemical counts on atom-volumetrical method of rocks chemic analysis, balance calculation for quantitative appraisal of migration and fixation of petrogenic components in metasomatic and ore-forming processes, calculations of statistic distribution parameters of metals in metasomatic haloes and rocks containing haloes to reconstruct geologic history of ore-genous elements.

The results: the author proves the material-genetic uniformity of the mineralization formed into both media and appurtenance of ore metasomatic haloes to combination of metasomatic formation – beresitic ones in the rear zones and propylitic ones in the outlying zones. Formation of the contrasting anomalies of femic elements association in K, Ti, P, Mg, Fe, Ca, Mn composition in rear zones of haloes in framing of abyssal fractures at Ti and P content decrease as moving off fractures down to clark levels due to alkaline regime solutions inversion into acidiferous one and change of elements in inert state clears the possibilities to use femic specialization of auriferous beresites phenomenon in order to prove generation of metalliferous solutions in moderate-alkaline basaltic melts. As the petrochemical prognosis-search criteria these phenomena assure positive prognosis, determination of solution-bringing function of fractures, controlling accommodation of deposits, and localization of sections for searching mineralization including those not revealed by daily surface. As the result of geologic history of metals reconstruction in near-ore space their subclark contents were defined, in particular, gold at the level of 0.5...3.0 mg/t in different crystalline rocks and black shale on and out of remote periphery of near-ore metasomatic haloes; distribution parameters of heightened and anomalous metal concentrations correlate directly with the intensity of near-ore metasomatic transformations of rocks. Positive prognosis on the basis of totality of petrochemical, geochemical and other tectonic, geodynamic, petrologic criteria of prognosis-search complex offered by the author earlier in contrast to the existing popular ideas does not depend on the level (clark, superclark) of pre-ore gold content of black shales.

Key words:

Mesothermal gold deposits, prognosis-search complex, crystal substratum, black shales, petrochemical, geochemical criteria.

REFERENCES

1. Kucherenko I.V. Petrologico-geokhimicheskie svidetelstva geologo-geneticheskoy odnorodnosti gidrotermal'nykh mestorozhdeniy zolota, obrazovannykh v chernoslantsevom i neslantsevom substrat [Petrologic-geochemical evidences of the geologic-genetic uniformity of the hydrothermal gold deposits formed in black shales and non shales substratum]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 25–35.
2. Korzhinskiy D.S. *Teoriya metasomaticheskoy zonalnosti* [The theory of metasomatic zoning]. Moscow, Nauka, 1982. 104 p.
3. Kucherenko I.V. Gidrodinamika treshchinno-porovykh porodno-flyuidnykh vzaimodeystviy i mekhanizm massoperevosa v protsessakh okolotreshchinno-gidrotermalnogo metasomatizma [Hydrodynamics of the fissure-pores rock-fluid interactions and mechanism of mass transfer in processes of fissure hydrothermal metasomatism]. *Razvedka i ohrana nedr – Prospecting and Protection of entrails*, 2010, no. 11, pp. 37–43.
4. Gavrilo A.M., Kryazhev S.G. Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti rud mestorozhdeniya Sukhoy Log [Mineral-geochemical features of the Sukhoy Log deposit ores]. *Razvedka i ohrana nedr – Prospecting and Protection of entrails*, 2008, no. 8, pp. 3–16.
5. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shchegolkov Yu.V., Alysheva E.I., Borisovskiy S.E. Okolorudny metasomatizm terrigenykh ugleorodistykh porod v Lenskom zolotorudnom rayone [The near-ore metasomatism of the terrigenous carboniferous rocks in Lenskiy gold-ore region]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy – Geology of the ore deposits*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 3–46.
6. Kryazhev S.G., Ustinov V.I., Grinenko V.A. Osobennosti flyuidnogo rezhima formirovaniya zolotorudnogo mestorozhdeniya Sukhoy Log po izotopno-geokhimicheskim dannym [The features of the fluid regime of Sukhoy Log gold deposit formation on the isotop-geochemical data]. *Geokhimiya – Geochemistry*, 2009, no. 10, pp. 1108–1117.
7. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. Sootnoshenie protsessov metamorfizma i rudoobrazovaniya na zolotom chernoslantsevom mestorozhdenii Sukhoy Log po dannym U-Th-Pb-izotopnogo SHRIMP-datirovaniya aktsessornykh mineralov [The ratio of the metamorphism and ore-formation in processes Sukhoy Log gold black-shale deposit on data of the accessory minerals U-Th-Pb-isotopic SHRIMP-date]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy – Geology of the ore deposits*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 32–64.
8. Ozerova N.A. *Rtut i endogennoe rudoobrazovanie* [Mercury and endogenous ore-formation]. Moscow, Nauka, 1986. 155 p.
9. Stepanov V.A., Moiseenko V.G. *Geologiya zolota, serebra i rtuti* [Geology of gold, silver and mercury]. Vladivostok, Dalnauka, 1993. 228 p.
10. Molchanov V.P., Hanchuk A.I., Medvedev E.I., Plyusnina L.P. Unikalnaya assotsiatsiya prirodnoy amalgamy zolota, kinovari, samorodnykh metallov i karbidov Fadeevskogo rudno-rossypnogo uzla, Primorye [Unique association of the natural amalgam of gold, cinnabarite, virgin metals and carbides of Fadeevskiy ore-placer knot, Primorye]. *Doklady RAN*, 2008, vol. 422, no. 4, pp. 536–538.

11. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Petrologo-geokhimicheskie cherty rudovmeshchayushchego metasomaticheskogo oreola zolotorudnogo mestorozhdeniya Chertovo Koryto (Patomskoe nagore) [Petrologic-geochemic traits of the ore-containing metasomatic haloe of Chortovo Koryto gold-ore deposit (Patomskoye upland)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 1, pp. 11–20.
12. Gavrilov R.Yu., Kucherenko I.V., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Geokhimicheskaya zonalnost rudovmeshchayushchego oreola mezotermalnogo zolotorudnogo mestorozhdeniya Chertovo Koryto (Patomskoe nagore) [Geochemic zoning of the ore-containing haloe of the mesothermal gold-ore Chortovo Koryto deposit (Patomskoye upland)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 42–47.
13. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Petrologo-geokhimicheskie cherty okolorudnogo metasomatizma v Verninskom zolotorudnom mestorozhdenii (Lenskiy rayon) [Petrologic-geochemic traits of the near-ore metasomatism in Verninskoye gold-ore deposit (Lenskiy region)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 22–33.
14. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Petrologo-geokhimicheskie cherty okolorudnogo metasomatizma v zolotorudnom mestorozhdenii Sukhoy Log (Lenskiy rayon). Ch. 3. Geokhimiya zolota i srebra [Petrologic-geochemic traits of the near-ore metasomatism in Sukhoy Log gold-ore deposit (Lenskiy region). P. 3. Gold and silver geochemistry]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 33–40.
15. Goldberg I.S. The formation of ores as self-organizational process of redistribution of metals. *Proc. of 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro*, Aug. 6–17, 2000. Congress Program. Rio de Janeiro, Geol. Surv. Brasil, 2000, p. 3771.
16. Shao Jun, Hui De-feng, Kong Xiang-min, Shou Nai-wy. Metallogeny of gold deposits of China. *Geology and Resources*, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 246–250.
17. Fridovskiy V.Yu., Gamyarin G.N., Goryachev N.A. Geologo-geneticheskaya model formirovaniya stratifitsirovannykh zolotokvartsevykh mestorozhdeniy Yuzhnogo Verkhoyanya [Geologic-genetic model of the formation of the stratified gold-quartz deposits, South Verkhoyania]. *Otechestvennaya geologiya – Native geology*, 2006, no. 5, pp. 33–37.
18. Large R.R., Maslennikov V.V., Robert Francois, Danyushevsky L.V., Chang Zhaoshan. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold-bearing province, Russia. *Economic Geology*, 2007, vol. 102, no. 7, pp. 1233–1267.
19. Meffre S., Large R.R., Scott R. Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment – hosted gold deposit, Russia. *Geochem. et Cosmochem. Acta*, 2008, vol. 72, pp. 2377–2391.
20. Galyamov A.L. Zolotonosnye osadochnye komplekсы skladchatogo obramleniya Sibirskoy platformy [Gold-bearing sedimentary complexes of the folded framing of the Siberian craton]. *Rudy i metally – Ore and metals*, 2010, no. 1, pp. 28–37.
21. Nemerov V.K., Stanevich A.M. Razvozhzaeva E.A., Budyak A.E., Kornilova T.A. Biogenno-sedimentatsionnye faktory rudoobrazovaniya v neoproterozoysskikh tolshchakh Baykalo-Patomskogo regiona [Biogenic-sedimentary factors ore-formation in Neo Proterozoic thicknesses of Baykal-Patomskoye region]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 5, pp. 729–747.
22. Kucherenko I.V. Prognozno-poiskovy kompleks dlya mezotermalnykh mestorozhdeniy zolota. Ch. 1. Tektonicheskiy i geodinamicheskiy kriterii [Prognosis-search complex for the mesothermal gold deposits. P. 1. Tectonic and geodynamic criteries]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 1, pp. 19–27.
23. Kucherenko I.V. Prognozno-poiskovy kompleks dlya mezotermalnykh mestorozhdeniy zolota. Ch. 2. Petrologicheskiy kriteriy [Prognosis-search complex for the mesothermal gold deposits. P. 2. Petrologic criterion]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 114–122.

УДК 552.56:550.838.4

ФАЦИАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ РУДОВМЕЩАЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ БАКЧАРСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Рудмин Максим Андреевич,

аспирант кафедры геологии и разведки полезных ископаемых

Института природных ресурсов ТПУ,

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: rudminma@tpu.ru

В связи с развитием скважинной гидродобычи установлена возможность разработки Бакчарского рудопоя данным способом. Из всех выделенных на рудопоявлении природных типов руд гидродобыча дает возможность добывать только «рыхлый» тип. Целью данной работы является оконтуривание площадей распространения «рыхлых» руд в пределах рудного поля на основе фациального анализа и обоснование оперативного способа выделения продуктивных толщ в разрезе.

В бакчарской рудовмещающей толще выделены фации оолитовых песков, песчано-алевритовых терригенных осадков и алевритистых глин. Установлено, что рыхлые руды Бакчарского железорудного проявления, разработка которых возможна методом скважинной гидродобычи, приурочены к фации оолитовых песков. Вычислены характерные параметры магнитной восприимчивости для литологических типов и фаций бакчарской рудовмещающей толщи, позволяющие определять железоносные отложения по керну буровых скважин. Полученные данные предлагается использовать при прогнозировании перспективных для гидродобычи руд и дифференциации осадочных отложений, вмещающих оолитовые железные руды.

Ключевые слова:

Бакчарское железорудное проявление, Западно-Сибирский железорудный бассейн, оолитовые руды, магнитная восприимчивость, каппаметрия, фации.

Введение

На территории Томской области издавна известны проявления железных руд. В 1625–1626 гг. велась их отработка на небольших Лагернотомском, Поздняковском и Аргатюльском месторождениях. Известно, что из них изготовлялись пушки для Томского острога. Однако наибольшее значение для промышленности на территории Томской области в настоящее время представляют крупные месторождения осадочных морских сидерит-гидрогетит-лептохлоритовых железных руд [1]. Одним из таких объектов является Бакчарское железорудное проявление, которое было открыто в 1957 г. при поисковых работах под руководством А.А. Бабина [2].

Бакчарское железорудное проявление расположено в юго-восточной части Западно-Сибирского железорудного бассейна (рис. 1). В административном отношении оно находится в 200 км от г. Томска на северо-запад. Проявления железа в Западно-Сибирском железорудном бассейне прослежены в полосе шириной 150 км и протяженностью около 2000 км (от бассейнов рек Турухан, Большая Хета на северо-востоке до истоков р. Омь на юго-западе). Общая площадь бассейна составляет 300000 км², в том числе на территории Томской области около 80000 км². Общие прогнозные запасы железных руд бассейна с содержанием железа более 30 % оцениваются в 400 млрд т, что позволяет считать его крупнейшей железорудной провинцией мира [1].

Железоносные отложения Бакчарского рудопоя представлены типичными осадками прибрежно-морских фаций – гравелитами, оолитовыми рудами, песчаниками, алевролитами и глинами. Оолитовые железные руды характеризуются в основном оолитами гетит-гидрогетитового состава и относятся к трем горизонтам (снизу вверх): нарым-

скому, колпашевскому и бакчарскому [2, 3]. Рудные горизонты залегают в соответствующих свитах: бакчарский горизонт приурочен к подошве люллин-ворской свиты, колпашевский – к ганькинской свите, нарымский – к кровле ипатовской свиты [3].



Рис. 1. Схема Западно-Сибирского железорудного бассейна [1, 3]: 1 – площадь распространения мел-палеогенового моря; 2 – полоса распространения прибрежно-морских железорудных отложений; 3 – площади наиболее крупных железорудных узлов (месторождений)

Существенный вклад в изучение железных руд Западно-Сибирского бассейна (литолого-фациальных особенностей, условий рудонакопления, минерального состава и т. д.) в середине прошлого века внесли А.А. Бабин, Н.Х. Белоус, Ю.П. Казанский, И.В. Николаева, А.Н. Кондаков и др. [2–4]. В 60-е гг. XX в. по горнотехническим и гидрогеологическим (высокая водообильность рыхлого разреза) условиям отработки геологоразведочные работы на Бакcharском рудопоявлении прекратились.

В настоящее время появились новые технологии (скважинная гидродобыча (СГД)), которые позволяют считать освоение Бакcharских железных руд перспективным. Проблема заключается в том, что данная технология не позволяет извлекать оолитовые железные руды в полном объеме. Из выделенных типов руд Бакcharского проявления [1–5] методом СГД возможно добывать только рыхлые оолитовые руды. Таким образом, в ближайшее время наибольший практический интерес представляет определенный природный тип руд, а именно «рыхлый».

Цель данной работы – с одной стороны, установить участки рудного поля, в пределах которых залегают «рыхлые» руды, с другой – обосновать экспрессный способ выделения продуктивных толщ в разрезе.

В данной статье описываются результаты комплексного изучения литолого-фациальных особенностей и магнитных свойств рудовмещающих толщ рудопоявления. Для выяснения закономерностей распределения железных руд автор использовал фациальный анализ, одним из главных результатов которого являлось создание фациальных схем. Подобные схемы визуально отражают динамику изменения условий осадкообразования. В рамках поставленной задачи осуществлялся анализ стратиграфических колонок скважин, геологических разрезов, а также изучались работы предшественников [1–5], в сопровождении с оптическими исследованиями образцов бакcharских руд. Фациальные схемы создавались к определенным этапам развития рудной толщи.

Литолого-фациальные исследования

По минеральному составу и текстурно-структурным особенностям на рудопоявлении были выделены следующие природные типы руд [1–5]:

- гидрогетитовая оолитовая рыхлая руда;
- гидрогетитовая оолитовая руда с сидеритовым цементом;
- гидрогетитовая оолитовая руда с хлорито-глинистым цементом;
- гидрогетитовая оолитовая руда с гидрослюдистым цементом;
- гидрогетитовая оолитовая руда с сидерит-хлоритовым цементом.

Гидрогетитовые оолитовые рыхлые руды встречаются в основном в нижней части бакcharского горизонта. Руды на 70...80 % состоят из ги-

дрогетитовых оолитов с концентрически-зональным строением и бобовин. Оолиты имеют размеры до 1 мм, но в среднем 0,2...0,5 мм. Цемент поровый, гидрогетит-глинистого состава. *Гидрогетитовые оолитовые крепко цементированные руды с сидеритовым цементом* локализуются в верхней части бакcharского горизонта. Содержание гидрогетитовых концентрически-зональных оолитов в руде составляет 30...40 % с преобладанием фракции 0,2...0,5 мм. Цемент базальный, сидеритовый с незначительным содержанием железистого хлорита. *Гидрогетитовые оолитовые слабо цементированные руды с хлорито-глинистым цементом* распространены в верхней части колпашевского горизонта. Руды содержат 40...50 % гидрогетитовых, гидрогетит-хлоритовых оолитов с концентрически-зональным строением, а также обломки бобовин. В единичных случаях встречаются обломки кварца размером более 1 мм, обломочный материал в основном представлен мелкозернистой фракцией 0,1...0,5 мм. Цемент состоит из хлорита с примесью глинистых минералов (каолинит). *Гидрогетитовые оолитовые средние цементированные руды с гидрослюдистым цементом* прослеживаются в нижних частях колпашевского горизонта. Руды на 40...50 % состоят из гидрогетитовых оолитов и оолитовых обломков скрытокристаллического строения размером в среднем 0,2...0,7 мм. Цемент гидрослюдистый, порово-базальный с зеленоватым оттенком. *Гидрогетитовые оолитовые крепко цементированные руды с сидерит-хлоритовым цементом* являются основным типом для нарымского горизонта. Содержание оолитов в рудах 45...50 %. Оолиты имеют гидрогетитовый состав и концентрически зональное строение, средние размеры 0,2...0,5 мм. Базальный цемент представлен неравномерным распределением микрошуйчатого хлорита и мелкозернистого сидерита.

Основная масса руды этих типов характеризуется гидрогетитовыми оолитовыми агрегатами концентрически-зонального строения. Можно сделать вывод, что главное отличие между выделенными типами руд заключается в характере и составе цемента, что определяется фациальной обстановкой.

После проведенных наблюдений нами выделены следующие основные фации [6, 7] осадочных отложений рудной толщи (рис. 2), которым соответствуют определенные природные типы руд. Выделенные фации рекомендуется использовать для прогнозирования площадей распространения перспективных оолитовых руд. Как уже отмечалось выше, в настоящее время на Бакcharском железорудном проявлении подобными являются «рыхлые» руды, отработка которых проектируется методом скважинной гидродобычи.

Фация пляжных отложений относится к группе литеральных фаций и характеризуется серыми, часто с зеленоватым оттенком, мелкозернистыми песками, алевроитами и слабо цементированными, мелкозернистыми, серыми песчаниками. Ко-

личество рудных оолитов в отложениях данной фации редко превышает 20 %. *Фация оолитовых песков* принадлежит к группе литоральных фаций, но в сравнении с предыдущей более отдалена от береговой линии. Главной отличительной особенностью этой фации является наличие разнозернистых, оолитовых песков черного, коричневатого-черного цвета, которые последовательно переходят в слабо сцементированные мелко-, среднезернистые оолитовые песчаники с хлоритовым и глинистым цементом. *Фация песчано-алевритовых терригенных осадков* относится к группе неритовых фаций и характеризуется средне-, слабосцементированными оолитовыми песчаниками с хлоритовым, гидрослюдистым, сидеритовым цементом, в большинстве случаев переслаиваются с маломощными зеленовато-серыми алевритами и глинами. В кровле песчано-алевритовой фации обычно встречаются маломощные (до 2 м) линзы гравелистов. *Фация алевритистых глин* принадлежит к группе неритовых фаций более высоких глубин и включает в себя слоистые, серые, часто с зеленоватым оттенком, глины, согласно переслаивающиеся с серыми алевритами.

Фация оолитовых песков является переходной к гиполитории, т. е. к открыто морским отложениям мелководного шельфа и располагается в пределах изобаты 30...50 м [6]. Учитывая общий равнинный рельеф берега древнего мел-палеогенового моря [3], эта фациальная обстановка характеризуется слабой динамикой водной среды, переменной геохимической обстановкой (щелочность, окислительный потенциал и т. д.) [6] и является благоприятной для формирования концентрически-зональных оолитов, глинистых (монтмориллонита) и хлоритовых минералов. На приуроченность сыпучих гидрогетитовых руд к фации оолитовых песков указывают следующие их основные особенности: хорошая степень сортированности аллотигенного материала, постоянство гранулометрического состава (0,2...0,5 мм), практически полное отсутствие сидерита и глауконита, а также концентрически-зональное строение оолитовых зерен с гидрогетитовыми и кварцевыми концентрами. В более глубоких условиях образовывались лептохлорит-гидрогетитовые оолиты, в частых случаях со скрытокристаллическим строением, а также микрозерна сидерита и глауконита.

Как уже было установлено [3], на фоне общего морского режима Западно-Сибирского железорудного бассейна в мел-палеогеновое время, формирование каждого рудного горизонта происходило в трансгрессивно-регрессивный цикл. На основе этих условий в бакчарском и колпашевском горизонте отмечается постепенное фациальное замещение крепкосцементированных руд слабосцементированными и рыхлыми.

В результате изучения фактических материалов (керна скважин 2005–2013 гг.) нами были построены фациальные схемы (рис. 2) на площади Бакчарского рудопоявления для основных этапов

формирования рудовмещающей толщи (кровли ипатовской, подошвы и кровли ганькинской, подошвы люллинворской свит).

В кровле ипатовской свиты (рис. 2, А; время формирования около 70–80 млн лет назад [3]) на всей площади рудопоявления были распространены фации песчано-алевритовых терригенных осадков (80 %) и алевритистых глин (20 %), что объясняет преобладание в нарымском рудном горизонте крепко сцементированных оолитовых руд с сидерит-хлоритовым цементом. В ганькинской свите (рис. 2, Б, В) преобладала фация песчано-алевритовых терригенных осадков (70 %), однако в кровле свиты среднесцементированные оолитовые песчаники переходят в слабосцементированные, что является следствием смены обстановки осадкообразования. Относительное преобладание фации оолитовых песков (32 %) в подошве люллинворской свиты (рис. 2, Г; время формирования около 50 млн лет [3]) обусловило наличие рыхлых оолитовых руд в нижней части бакчарского рудного горизонта.

При этом важно понимать, что сменяющие друг друга фации оолитовых песков и песчано-алевритовых терригенных осадков отвечают переходной морской обстановке (между литоральной и неритовой). Рудоотложение происходило в этой обстановке на фоне изменений pH от 4 до 7, при относительно слабой динамике водной среды, за счет чего формировались оолиты концентрически-зонального строения [3]. Природные типы руд приурочены именно к этим двум фациям. Фация оолитовых песков локализует слабосцементированные и сыпучие руды, фация песчано-алевритовых терригенных осадков – крепко- и среднесцементированные. Фация оолитовых песков распространена в восточной (южнее с. Бакчар) и западной (окрестности д. Полынянка) частях рудопоявления (рис. 2, Г), что позволяет считать эти области наиболее перспективными для разработки сыпучих гидрогетитовых руд.

Петромагнитные исследования

Для установления магнитных свойств рудовмещающих толщ Бакчарского проявления совместно с фациальными исследованиями производилось измерение магнитной восприимчивости методом капаметрии. Важно отметить, что первые данные по магнитной восприимчивости некоторых образцов оолитовых железных руд Бакчарского рудопоявления были опубликованы в 2009 г. [8]. Для измерения магнитной восприимчивости керны нами использовался прибор КТ-10, который является совместной разработкой компании Terraplus Inc. (Ричмонд Хилл, Онтарио, Канада), компании-поставщика геофизического оборудования, и компании Georadis S.R.O. (Чешская республика). Характеристика прибора позволяет проводить измерения с чувствительностью $1 \cdot 10^{-6}$ ед. Си. Основные замеры осуществлялись в режиме «scanner» (сканирования), при котором в секунду производилось

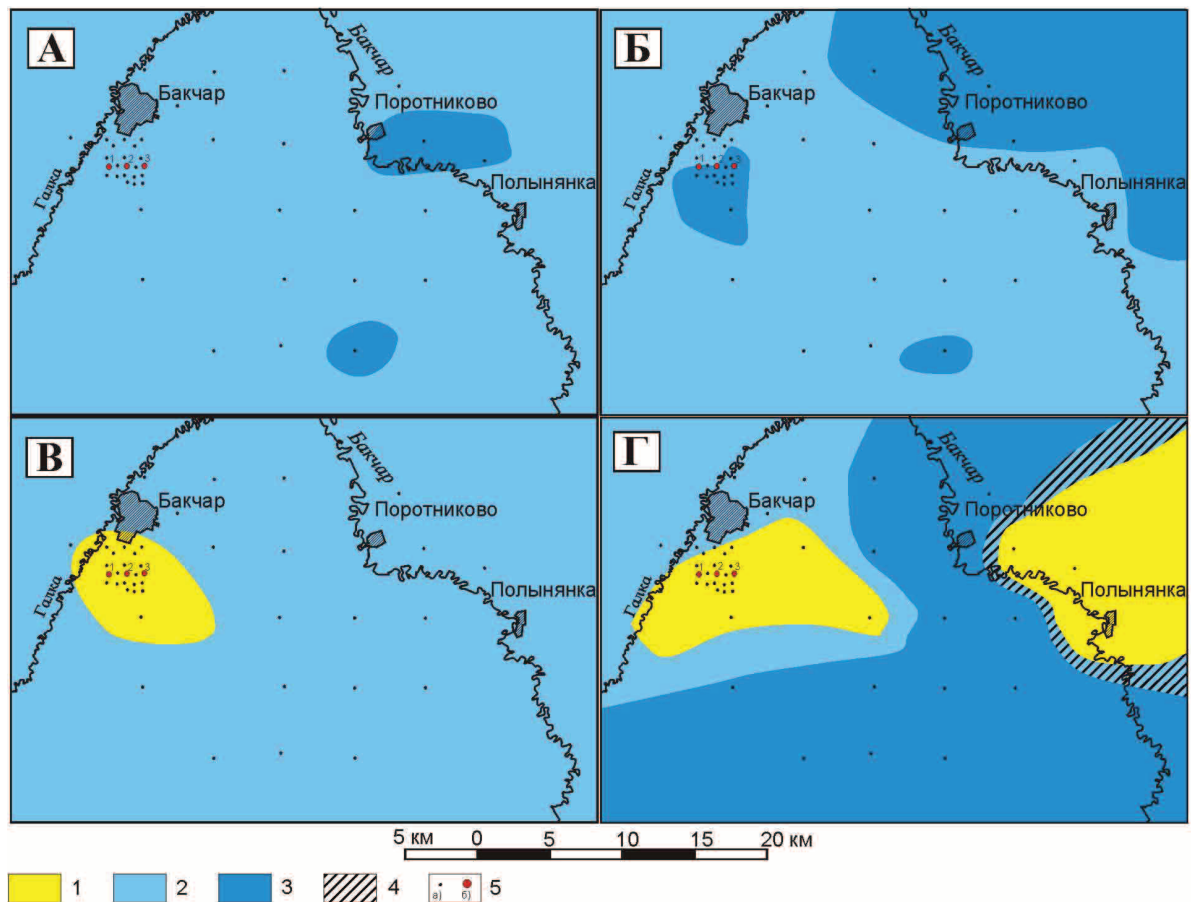


Рис. 2. Фациальные схемы рудовмещающих отложений Бакcharsкого железорудного проявления: А – кровля ипатовской свиты; Б – подошва ганькинской свиты; В – кровля ганькинской свиты; Г – подошва люллинворской свиты; 1 – фация оолитовых песков; 2 – фация песчано-алевритовых осадков; 3 – фация алевритистых глин; 4 – предполагаемые фации; 5 – положение скважин на плане

20 измерений, из которых сохранялись 4 усредненных замера. Проверочные измерения выполнялись в режиме «measure» с шагом 40 см. Значение истинной магнитной восприимчивости автоматически высчитывалось прибором согласно встроенному алгоритму корректировки, при этом учитывалась поправка на геометрию образца, в данном случае на диаметр керна. Обработка данных сканирования заключалась в высчитывании средних значений магнитной восприимчивости на каждые 10 см керна и выполнялась посредством MS Office Excel.

Магнитная восприимчивость сравнивалась с процентным содержанием железа, полученным по данным рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). РФА выполнялся анализатором INNOV-X Delta в режиме «Горный+», в котором фиксировались элементы от магния и выше по атомному номеру. Прибор позволяет измерять массовые доли химических элементов от сотых долей процентов. Сканирование керна осуществлялось с шагом 20 см.

Общая длина измеренного керна, суммированного по 14 скважинам, составляет около 2800 м. Всего было сделано более 9000 замеров магнитной восприимчивости, при этом на долю контрольных

приходится 25 % измеренного керна, и около 14000 замеров методом РФА.

В целом среднее значение магнитной восприимчивости Бакcharsкого рудопоявления составляет $0,411 \cdot 10^{-3}$ ед. Си, для нерудных вмещающих толщ (как над-, так и подрудных) – $0,259 \cdot 10^{-3}$ ед. Си, для рудного горизонта – $0,822 \cdot 10^{-3}$ ед. Си. При этом максимальное значение характерно для скважины, пробуренной на восточной части проявления (около с. Поротниково), и равно $1,4 \cdot 10^{-3}$ ед. Си, это можно объяснить преобладанием в разрезе скважины фации песчано-алевритовых терригенных осадков.

В табл. 1 представлены вычисленные средние значения, стандартное отклонение магнитной восприимчивости и процентного содержания железа для основных литологических типов рудовмещающего горизонта, дифференцированные по структурно-вещественным особенностям. Судя по полученным данным (табл. 1), выделенные литологические типы имеют характерные значения магнитной восприимчивости.

Рудовмещающая толща в большинстве скважин вскрывается маломощной (от 0,2 до 1 м) толщей гравелитов (рис. 3), которые характеризуются

высокими значениями магнитной восприимчивости ($2,315 \cdot 10^{-3}$ ед. Си), при относительно невысоком содержании железа. Слабо различаются по магнитной восприимчивости крепкоцементированные оолитовые песчаники колпашевского и нарымского горизонта, хотя содержание железа в них по данным РФА имеет порядковое отличие, это объясняется наличием хлорит-сидеритового цемента в последних. Продуктивные оолитовые пески (рис. 3) характеризуются наиболее постоянными значениями магнитной восприимчивости ($0,507 \cdot 10^{-3}$ ед. Си) при относительно низком стандартном отклонении $0,111 \cdot 10^{-3}$ ед. Си. Крепкоцементированные песчаники люллинворской свиты имеют сидеритовый цемент, что объясняет наиболее высокие значения магнитной восприимчивости и содержания железа.

Таблица 1. Магнитная восприимчивость (данные каппаметрии) и относительное процентное содержание железа (данные РФА) литологических типов рудовмещающей толщи Бакчарского рудопроявления

Свита	Литологический тип	Магнитная восприимчивость, $\times 10^{-3}$ ед. Си		Относительное процентное содержание железа, %	
		Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение
Люллинворская	Глины	0,370	0,070	3,1	0,7
	Гравелиты	2,315	1,499	15,0	8,7
	Песчаники оолитовые, крепко сцементированные	1,324	0,217	23,0	4,1
	Песчаники оолитовые, слабо сцементированные	0,651	0,283	24,0	6,4
	Песок оолитовый	0,507	0,111	19,8	4,7
Ганькинская	Песчаники оолитовые, слабо сцементированные	0,475	0,125	14,4	5,0
	Песчаники оолитовые, средне сцементированные	0,644	0,136	13,2	2,5
	Песчаники оолитовые, крепко сцементированные	0,878	0,124	14,2	3,2
	Песок оолитовый	0,593		30,6	
	Глины и алевролиты	0,613	0,207	8,9	1,2
	Песчаники оолитовые, крепко сцементированные	0,857	0,252	9,7	1,4
Ипатовская	Глины и алевролиты	0,805	0,254	8,6	2,8
	Алевролиты	2,250	0,863	5,5	2,4
	Песок	0,350	0,189	3,5	1,2
	Песчаники оолитовые, крепко сцементированные	0,857	0,252	9,7	1,4

Оолитовые песчаники ганькинской свиты характеризуются пониженными значениями магнитной восприимчивости относительно остальных литологических типов руд. Это обусловлено относительно меньшим количеством гетит-гидрогетитовых оолитов, что также отражается в понижен-

ном содержании железа, и преобладанием немагнитного глинистого, хлорит-глинистого цемента.

Крепкоцементированные оолитовые песчаники колпашевского горизонта имеют относительно низкое среднее содержание железа в сравнении с оолитовыми песками бакчарского горизонта. Однако средняя магнитная восприимчивость первых значительно выше последних ($0,878 \cdot 10^{-3}$ и $0,507 \cdot 10^{-3}$ ед. Си соответственно). Также отмечается повышение среднего значения магнитной восприимчивости от слабо- до крепкоцементированных оолитовых песчаников колпашевского горизонта при относительно равном содержании железа. Приведенные факты доказывают, что магнитная восприимчивость зависит не только от содержания железа в толще пород, но и от структурных особенностей.

В табл. 2 представлены рассчитанные значения магнитной восприимчивости и относительного процентного содержания железа для вышеописанных фаций. Каждая из фаций характеризуется определенными значениями при относительно невысоком стандартном отклонении.

Таблица 2. Магнитная восприимчивость (данные каппаметрии) и процентное содержание железа (данные РФА) фаций рудовмещающей толщи Бакчарского рудопроявления

Фация	Магнитная восприимчивость, $\times 10^{-3}$ ед. Си		Относительное процентное содержание железа, %	
	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение
Фация пляжных отложений	0,35	0,189	3,5	1,2
Фация оолитовых песков	0,39	0,104	14,5	3,7
Фация песчано-алевритовых терригенных осадков	1,34	0,266	13,4	2,0
Фация алевритистых глин	0,56	0,195	6,5	0,9

Фация оолитовых песков имеет близкое среднее процентное содержание с фацией песчано-алевритовых осадков, при этом существенно отличается средним значением магнитной восприимчивости. Это объясняется, в первую очередь, структурным фактором, согласно которому крепко- и среднесцементированные песчаники имеют более высокую магнитную восприимчивость в сравнении со слабосцементированными и рыхлыми.

По полученным данным можно стратифицировать железозносные осадочные отложения. На рис. 3 представлен пример корреляции продуктивной фации в разрезе скважин Бакчарского рудопроявления по каппаметрии. В большинстве случаев фация оолитовых песков перекрывается крепкоцементированными оолитовыми песчаниками,

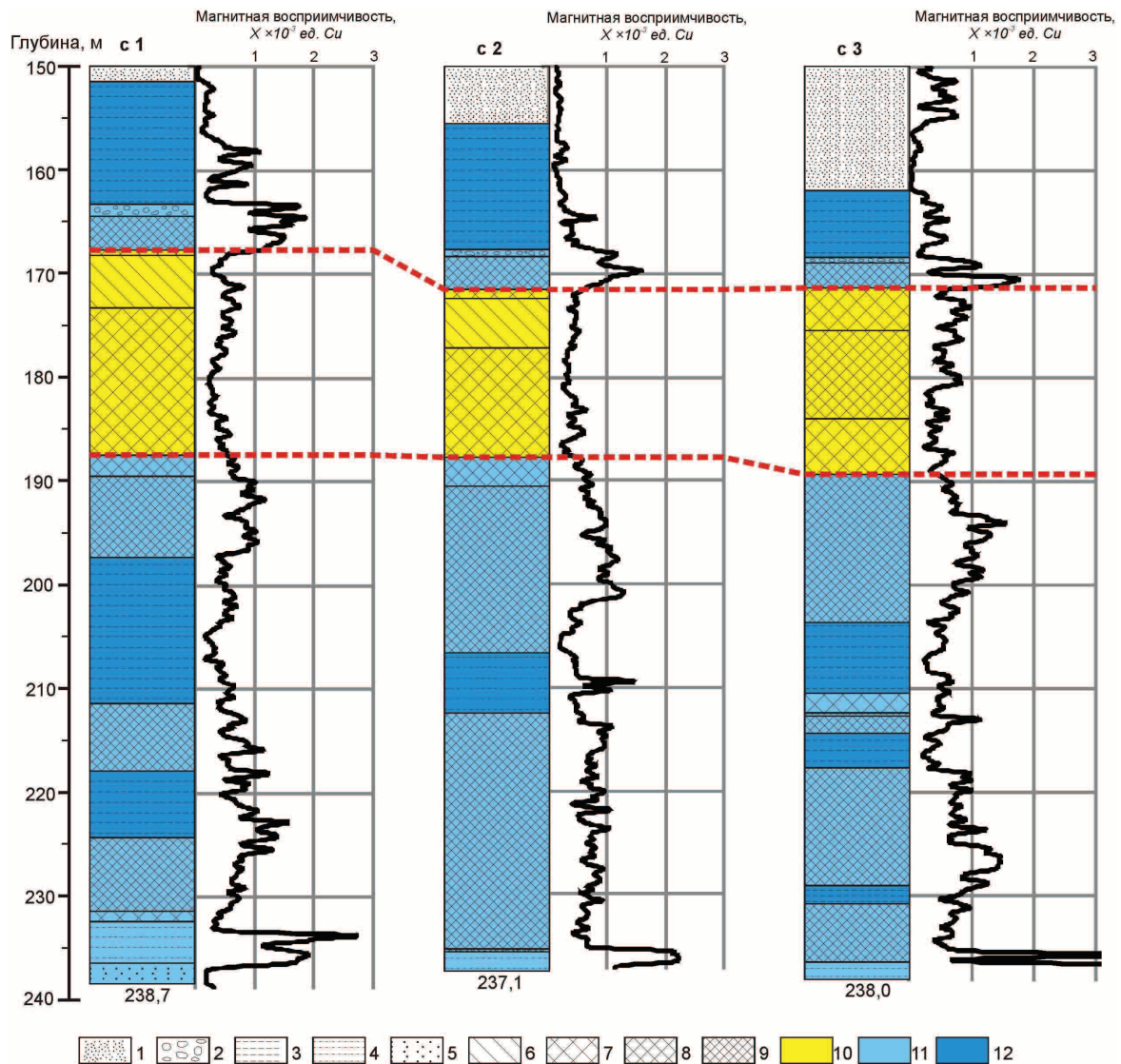


Рис. 3. Схема корреляции фации оолитовых песков по магнитной восприимчивости: 1 – песок; 2 – гравелит; 3 – глина; 4 – алевролит; 5 – песчанник (нерудный); 6 – рыхлая оолитовая руда; 7 – слабосцементированный оолитовый песчанник; 8 – среднесцементированный оолитовый песчанник; 9 – крепкосцементированный оолитовый песчанник; 10 – фация оолитовых песков; 11 – фация песчано-алевролитовых осадков; 12 – фация алевритистых глин

имеющими порядковое отличие в значениях магнитной восприимчивости (табл. 2), и подстилается фацией песчано-алевролитовых осадков, которая также характеризуется более высокими значениями. Учитывая полученные данные и факт, что капметрия в настоящее время является экспрессным и недорогим методом, его можно рекомендовать для выделения продуктивной толщи в полевых условиях при проведении геологоразведочных работ на Бакчарском железорудном проявлении.

Обсуждение результатов

В результате исследований были установлены фации рудовмещающей толщи и построены схемы, на которых отмечены площади распространения этих фаций в пределах Бакчарского железорудного проявления. Определена приуроченность известных природных типов руд к выявленным фациям.

На основе гранулометрического и минерального состава, хорошей степени сортированности осадочного материала, концентрически-зонального строения оолитов сыпучие руды были отнесены к фации оолитовых песков. На построенных схемах (рис. 2) показано, что фация оолитовых песков имеет максимальное распространение в подошве люллин-ворской свиты и занимает восточную и западную часть рудопоявления. Это позволило наметить две наиболее перспективные области локализации рыхлых руд (восточную (южнее с. Бакчар) и западную (окрестности д. Польшанка)), пригодных для отработки методом скважинной гидродобычи.

По полученным данным капметрии были вычислены характерные параметры магнитной восприимчивости фаций и литологических типов рудного горизонта. Для продуктивных оолитовых песков установлено среднее значение магнитной вос-

приемчивости $0,507 \cdot 10^{-3}$ ед. Си при стандартном отклонении $0,111 \cdot 10^{-3}$ ед. Си (табл. 1).

Показана зависимость между структурными особенностями осадков и значениями магнитной восприимчивости. На примере колпашевского горизонта доказано, что крепкосцементированные руды имеют более высокие значения магнитной восприимчивости в отличие от слабосцементированных, несмотря на почти равное процентное содержание железа. В итоге установлено, что с увеличением степени цементации возрастает средняя магнитная восприимчивость пород. Полученные данные могут быть успешно использованы при дифференциации осадочных отложений, вмещающих оолитовые железные руды.

Измерение магнитной восприимчивости кернового материала методом каппаметрии можно выполнять в полевых условиях. Вычисленные нами параметры магнитной восприимчивости позволят оперативно определять железорудные отложения по керну скважин на основе эмпирических данных. В силу низких финансовых затрат и простоты обслуживания прибора рекомендуется использовать каппаметрию для выделения продуктивных толщ при проведении геологоразведочных работ на Бакcharском железорудном проявлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы освоения Бакcharского железорудного месторождения, Томская область / А.К. Мазуров, Г.Ю. Боярко, В.Г. Емешев, А.В. Комаров // Руды и металлы. – 2006. – № 2. – С. 64–70.
2. Бабин А.А. Бакcharское железорудное месторождение (геология, закономерности размещения и генезис железных руд): дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 1969. – 248 с.
3. Западно-Сибирский железорудный бассейн / под ред. Ф.Н. Шахова. – Новосибирск: СО РАН СССР, 1964. – 448 с.
4. Николаева И.В. Бакcharское месторождение оолитовых железных руд. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1967. – 129 с.
5. Пшеничкин А.Я., Домаренко В.А. Петрографо-geoхимические особенности Бакcharского месторождения // Вестник науки Сибири. – 2011. – № 1 (1). – С. 13–18. URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/viewPDFInterstitial/17/82> (дата обращения: 20.12.2012).
6. Логвиненко Н.В. Морская геология. – Л.: Недра, 1980. – 344 с.

Выводы

1. Выделены основные фации рудовмещающей толщи Бакcharского проявления: фация пляжных отложений, фация оолитовых песков, фация песчано-алевролитовых осадков, фация алевритистых глин. Установлено, что рыхлые и слабосцементированные руды приурочены к фации оолитовых песков, среднесцементированные и крепкосцементированные руды – к фации песчано-алевролитовых осадков.
2. Получены характерные параметры магнитной восприимчивости для литологических типов и фаций рудного горизонта, которые позволяют определять продуктивные железозносные толщи по керну буровых скважин. Фация оолитовых песков характеризуется средним значением магнитной восприимчивости $0,39 \pm 0,1 \cdot 10^{-3}$ ед. Си, фация песчано-алевритовых осадков – $1,34 \pm 0,25 \cdot 10^{-3}$ ед. Си. Установлена зависимость между структурными особенностями и значениями магнитной восприимчивости осадочных отложений.
3. Предложено использование каппаметрии в комплексе геологоразведочных работ на осадочных железорудных объектах в целях выделения продуктивных горизонтов.
7. Рудмин М.А. Особенности осадочных отложений, вмещающих железные руды Бакcharского месторождения (Томская область) // Металлогения древних и современных океанов-2013. Рудоносность осадочных и вулканогенных комплексов: материалы XIX научной молодежной школы. – Миасс, 22–25 Апреля 2013. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2013. – С. 120–123.
8. Бакшт Ф.Б., Пшеничкин А.Я. Каппаметрические исследования пород и руд Бакcharского месторождения // Проблемы и перспективы развития минерально-сырьевой базы и предприятия ТЭК Сибири: Матер. межрегиональной научно-практ. конф. и круглых столов. – Томск, 2009. – Томск: ЦНТИ, 2009. – С. 160–167

Поступила 25.07.2013 г.

FACIAL FEATURES AND MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF ORE-HOSTING SEDIMENTS OF BAKCHAR IRON ORE OCCURRENCE (TOMSK REGION)

Maxim A. Rudmin,

Tomsk Polytechnic University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: rudminma@tpu.ru.

Due to hydraulic mining improvement there is a possibility to development prospects of Bakchar ore occurrence. There are various types of ores identified within the ore occurrence and hydraulic mining can be applied to extract loose ore only. The paper deals with loose ore contouring within the orefield based on the result of facies analyses. It also aims to ground the method to identify productive strata in the geological section. In Bakchar enclosing rock mass there are facies of oolitic sands, terrigenous silt sandstones and aleuric clay. It is found that friable iron ore of Bakchar deposit, which is possible to be developed by hydraulic mining, is confined to oolitic sands facies. Characteristic parameters of the magnetic susceptibility of lithological types and facies of Bakchar ore-hosting unit were calculated. The obtained data could be used to predict the perspective ore horizons for hydraulic mining and to identify sediments containing oolitic iron ore.

Key words:

Bakchar iron ore occurrence, West Siberian iron ore basin, oolitic ore, magnetic susceptibility measurements, kappametriya, facies.

REFERENCES

1. Mazurov A.K., Boyarko G.Yu., Emeshev V.G., Komarov A.V. Perspektivy osvoeniya Bakcharskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya, Tomskaya oblast [Prospects of Bakchar ore field development, Tomsk region]. *Rudy i metally*, 2006, no. 2, pp. 64–70.
2. Babin A.A. *Bakcharskoe zhelezorudnoe mestorozhdenie (geologiya, zakonornosti razmeshheniya i genezis zheleznykh rud. Avtoref. Dis. Kand. geologo-mineralogicheskikh nauk* [Bakchar iron ore deposit (geology, occurrence characteristics and genesis of iron ores). Geol.-mineral. Cand. Diss.]. Tomsk, 1969. 248 p.
3. *Zapadno-Sibirskiy zhelezorudny bassein* [West Siberian iron ore basin]. Ed. by F.N. Shakhov. Novosibirsk, SO RAN SSSR, 1964. 448 p.
4. Nikolaeva I.V. *Bakcharskoe mestorozhdenie oolitovykh zheleznykh rud* [Bakchar oolitic iron ore deposit]. Novosibirsk, SO AN SSSR, 1967. 129 p.
5. Pshenichkin A.Ya., Domarenko V.A. Petrografo-geokhimicheskie osobennosti Bakcharskogo mestorozhdeniya [Petrographic and geochemical characteristics of Bakchar deposit]. *Siberian Journal of Science*, 2011, no. 1 (1), pp. 13–18. Available at: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/viewPDFInterstitial/17/82> (accessed 20 December 2012)
6. Logvinenko N.V. *Morskaya geologiya* [Marine Geology]. Leningrad, Nedra, 1980. 344 p.
7. Rudmin M.A. Osobennosti osadochnykh otlozheniy, vmeshchayushchikh zheleznye rudy Bakcharskogo mestorozhdeniya (Tomskaya oblast) [Characteristics of sediments enclosing iron ores of Bakchar deposit (Tomsk region)]. *Metallogeniya drevnykh i sovremennykh okeanov 2013. Rudonosnost osadochnykh i vulkanogennykh kompleksov: materialy XIX nauchnoy molodezhnoy shkoly* [Metallogeny of ancient and modern oceans-2013. Ore-bearing sedimentary and volcanogenic complexes: materials of the XIX scientific school for youth]. Miass, 22–25 April, 2013. Miass, IMin UrO RAN, 2013, pp. 120–123.
8. Baksht F.B., Pshenichkin A.Ya. Kappametricheskie issledovaniya porod i rud Bakcharskogo mestorozhdeniya [Magnetic susceptibility of measurement of rocks and ores of Bakchar deposit]. *Problemy i perspektivy razvitiya mineralno-syrevooy bazy i predpriyatiya TEK Sibiri. Materialy mezhr regionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i kruglykh stolov* [Problems and development prospects of mineral resources and fuel and energy complex of Siberia. The Materials of interregional scientific and practical conference and roundtables]. Tomsk, 2009. Tomsk, CNTI, 2009, pp. 160–167.

УДК 552.321.6:553.08

ЭВОЛЮЦИЯ СУЛЬФИДНОГО РАСПЛАВА В ПРОЦЕССЕ ОБРАЗОВАНИЯ КИНГАШСКОГО УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА (СЕВЕРО-ЗАПАД ВОСТОЧНОГО САЯНА)

Юричев Алексей Николаевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры петрографии
геолого-географического факультета Томского государственного университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: juratur@sibmail.com

Объектом исследования является сульфидная минерализация пород Кингашского дунит-верлит-пикритового массива, представляющего собой петротип одноименного ультрамафитового комплекса в Канской глыбе (северо-западная часть Восточного Саяна) и включающего одноименное крупное Cu-Ni с ЭПГ месторождение. Несмотря на повышенный интерес многих исследователей к массиву, ряд вопросов его петрологической природы, а также механизмы формирования и локализации в нем Pt-Cu-Ni руд по настоящее время остаются дискуссионными. В настоящей статье предпринята попытка проследить эволюцию вещественного состава сульфидного расплава в процессе формирования пород исследуемого массива и их последующих метаморфических изменений. Представлены типоморфизм, минеральный и химический состав сульфидных минералов. Проведенные исследования показывают, что сульфидная минерализация пространственно связана со всеми породами Кингашского массива, но промышленные количества руды установлены преимущественно в дунитах. Особенности состава сульфидной ассоциации указывают на высокую железистость в целом кингашской рудно-магматической системы и сближают ее с медно-никелевыми месторождениями раннего протерозоя. Генетической особенностью сульфидного рудообразования Кингашского массива является относительно быстрое снижение температуры сульфидного расплава без значительного его фракционирования в процессе высокой скорости транспортировки магмы из мантийного очага в верхние этажи литосферы. Типоморфные особенности и химический состав сульфидных минералов, их соотношение и парагенезис позволили предположить два этапа в формировании отмеченной минерализации (магматический и низкотемпературный эпимагматический), а также реконструировать эволюцию сульфидного расплава по мере кристаллизации пород массива.

Ключевые слова:

Кингашский массив, ультрамафиты, сульфидная минерализация, химизм, эволюция расплава.

Введение

Ультрамафитовые и мафит-ультрамафитовые массивы считаются производными мантийных расплавов и несут не только ценную информацию о глубинных зонах Земли, но и позволяют проследить эволюцию ультраосновного и основного магматизма. С ними связаны месторождения хромитовых, медно-никелевых сульфидных руд, элементов платиновой группы (ЭПГ) и др.

Ультрамафиты и мафиты различной формационной принадлежности пользуются значительным распространением в пределах Канской глыбы Восточного Саяна. Они картируются в виде многочисленных массивов, чаще небольших размеров, и привлекают внимание многих исследователей в связи с их потенциальной рудоносностью [1–8]. Однако формационная принадлежность и металлогенетическая специализация данных объектов часто оказываются дискуссионными и требуют дальнейшего изучения.

Объектом настоящего исследования является сульфидная минерализация Кингашского дунит-верлит-пикритового массива, являющегося эталонным объектом для одноименного ультрамафитового комплекса и включающего в себя одноименное крупное Cu-Ni с ЭПГ месторождение [9]. Несмотря на повышенный интерес в последние несколько десятилетий исследователей к массиву, остаются до конца нерешенными вопросы глубины его формирования, комагматичности ультраосновных и основных пород, условий формирования и локализации руд.

Ранее исследования рудной минерализации Кингашского массива были проведены В.Н. Князевым [10], Г.И. Шведовым с соавторами [11, 12], Т.А. Радомской [13]. Однако интерес первых двух исследователей был связан в основном с благороднометалльной минерализацией (в частности – с платиноидами), а сульфидное Cu-Ni оруденение охарактеризовано на уровне вещественного состава без отнесения его к конкретным породным разновидностям. В.Н. Князевым впервые получены данные по изотопам серы в рудах месторождения, а также доказана генетическая связь медно-никелевой и золото-сульфидной формаций Кингашского рудного района с единой рудогенерирующей системой раннепротерозойского возраста. Полученные особенности вещественного состава сульфидной ассоциации и распределение ЭПГ в Cu-Ni рудах позволили исследователю предположить, что кристаллизация сульфидной жидкости происходила при быстром ее охлаждении.

Т.А. Радомской по типоморфным особенностям выделены разновидности Pt-Cu-Ni руд и показаны особенности их минерального и химического составов, составлена карта минералогических типов руд. На основе химического состава пирротина исследователем, в противовес результатам В.Н. Князева, сделано предположение о медленном остывании сульфидного расплава [13. С. 12].

На основании полученных оригинальных результатов систематизированы ранее имеющиеся данные, а также впервые предпринята попытка, основываясь на возрастном выделении пород Кингашского массива и на изучении выявленной в

данных породах сульфидной минерализации, проследить эволюцию вещественного состава сульфидного расплава в процессе формирования пород исследуемого массива (от дунитов к пикритам) и их последующих метаморфических изменений.

Полученные результаты позволят сосредоточить проведение поисковых и разведочных работ на Cu-Ni оруденение в многочисленных слабоизученных ультрамафитовых телах кингашского комплекса Канской глыбы Восточного Саяна.

Краткая геологическая характеристика исследуемого объекта

Кингашский дунит-верлит-пикритовый комплекс (AR_2-PR_1) представлен линзовидными телами размером от нескольких десятков метров до 15 км при мощности от первых метров до 100 м и более, которые обычно имеют северо-западное простирание и развиты в составе метаморфизованной толщи Канского докембрийского выступа в южном складчатом обрамлении Сибирской платформы. Характерной особенностью пород комплекса является наличие в них кумулятивных и бластопорфировых структур, свидетельствующих об их образовании в гипабиссальных и субвулканических условиях [14].

Наиболее представительным и эталонным объектом этого комплекса является Кингашский массив, который неоднократно изучался многими исследователями [5, 9, 15–21] и включает в себя одноименное Cu-Ni с ЭПГ месторождение. Он отличается довольно сложным и неоднозначным внутренним строением, в связи с чем, несмотря на пристальное к нему внимание, многие аспекты его внутреннего строения и происхождения остаются дискуссионными. Одни исследователи относят его

к расслоенным интрузиям [9], другие считают его субвулканическим телом базальт-коматиитовой формации [17–21], третьи рассматривают его в качестве фрагмента кингашского базальт-коматиитового вулканического комплекса [16, 22], четвертые считают, что по формационным признакам массив больше соответствует полигенным комплексам, а не расслоенным интрузиям [15].

Кингашский массив в плане картируется в виде крупной линзы (3?0,7 км), вытянутой в северо-западном направлении, и имеет согласное залегание со структурой пород обрамления. Контакты его с вмещающей толщей тектонические [23]. Массив сложен ультрамафитами и габброидами, со значительным преобладанием первых. Ультрамафиты обнажаются в его северной части, а в южной они перекрываются габброидами (рис. 1).

Согласно нашим исследованиям, ультрамафитовая часть разреза массива сложена, преимущественно, кумулятивными дунитами и их серпентинизированными разностями, при этом верлиты и пикриты пользуются ограниченным распространением. Выделяемые породы не обнаруживают какой-либо стратификации в массиве, а распределяются хаотично. Можно предположить, что образование ультрамафитового тела осуществлялось в магматической камере в условиях активной тектонической обстановки, когда режим сжатия периодически сменялся растяжением. В моменты растяжения, очевидно, происходило пульсационное внедрение в камеру по образовавшимся в ней ослабленным зонам неоднородных по составу ультраосновных расплавов, которые возникли в результате магматической дифференциации в глубинных промежуточных магматических очагах.

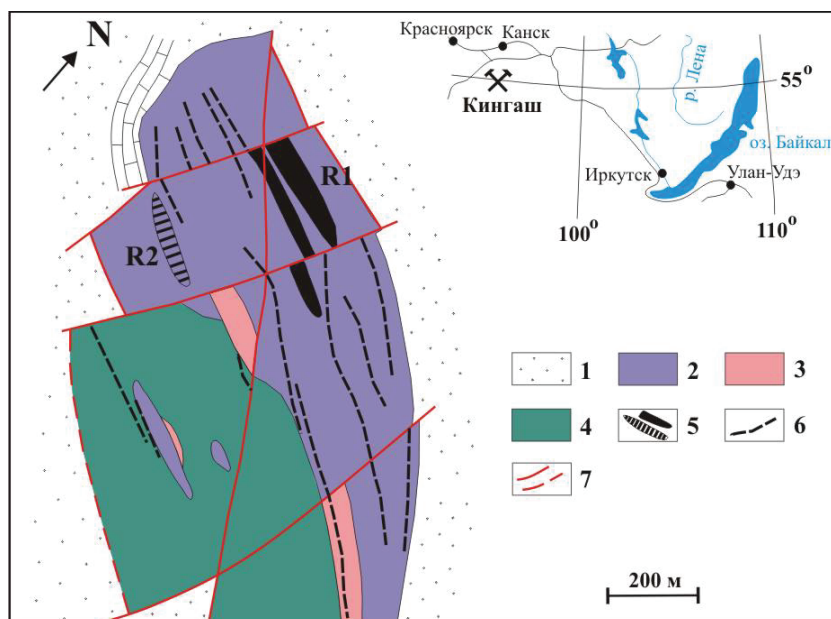


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Кингашского массива (по [24]): 1 – позднеархейская бирюсинская свита, представленная амфиболитами и гнейсами с прослоями мраморов; 2, 3 – ультрамафиты: 2 – дуниты и верлиты, 3 – клинопикроксениты; 4 – габбро; 5 – продуктивные платиноидные горизонты: разведанный (R1), предполагаемый (R2); 6 – отдельные тела с вкрапленной пентландит-пирротин-халькопиритовой минерализацией; 7 – тектонические нарушения

Габброиды, перекрывающие ультрамафиты, очевидно, представляют собой последующую, оторванную по времени, фазу внедрения, при этом наблюдаемые на контакте ультрамафитов и габброидов клинопироксениты, вероятно, являются реакционными образованиями [5].

Методика исследования

Рудные минералы в породах массива изучались в проходящем и отраженном свете на поляризационном микроскопе Axioscop 40 Pol. Анализ их вещественного состава, а также получение качественных изображений в отраженных электронах (режим BSE) [25] выполнен методом рентгеноспектрального микроанализа на электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega II LMU», оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск), аналитики А.С. Кульков, О.В. Бухарова. Для этого из отобранных образцов пород с рудной минерализацией были изготовлены плоскопараллельные аншлифы толщиной 3...4 мм по рекомендуемым методикам [25, 26]. Перед проведением анализов на исследуемые поверхности предварительно напыляли слой углерода толщиной 30 нм. Последующие расчеты химических составов проводились по программе INCA-Issue 18b.

Сульфидная минерализация

Сульфидная минерализация содержится во всех ультраосновных породах массива. На последние приходятся все промышленные запасы никеля, меди, кобальта и благородных металлов Кингашского месторождения. Сульфидные руды преимущественно вкрапленные (интерстиционно-вкрапленные, гнездово-вкрапленные, сидеронитовые и шпирово-вкрапленные) и охватывают в разной степени все ультрамафиты месторождения (рис. 2). Жильные сульфидные руды (брекчиевидные, массивные и флюидально-полосчатые, прожилковые) распространены в ограниченном объеме (около 0,3 %), их мощность – до 1,5 м. В приповерхностной зоне месторождения развиты зона окисления и кора выветривания. Рудная минерализация также охватывает и породы экзоконтакта в виде вкрапленности и прожилков сульфидов.

Главными сульфидными минералами Кингашского массива являются пирротин, пентландит и халькопирит (рис. 2). Халькопирит занимает подчиненное положение. Второстепенные рудные минералы представлены кубанитом, маккинавитом, валлериитом, борнитом, халькозином, ковеллином, сфалеритом, галенитом, никелином, Си-пентландитом, кобальтином, виоларитом, паркеритом, маухеритом, герсдорфитом и др. [10].

Пирротин является наиболее распространенным сульфидом и отмечается как в ультрамафитах массива, так и во вмещающих его породах. Во

вкрапленной минерализации он представлен в виде двух полиморфных модификаций: троилита (FeS) и, в меньшей степени, гексагонального пирротина (Fe_{1-x}S), а в массивных и брекчиевидных рудах относится к гексагональной модификации (рис. 3, а). Размеры зерен пирротина во вкрапленных рудах составляют до 2 мм (рис. 2, б, ж, з). В жильных рудах его содержание значительно увеличивается, вплоть до образования мономинеральных прожилков мощностью до 0,8 мм.

Большинство проанализированных пирротитов стехиометричны по своему химическому составу (табл. 1), что, очевидно, может быть связано с быстрым остыванием сульфидного расплава [27]. Количество Fe в пирротинах уменьшается от ранних вкрапленных руд в дунитах к эпигенетическим брекчиево-жильным и сплошным рудам. По мере снижения отношения Fe/S в минерале отмечается увеличение содержаний Ni и Co (рис. 3, а). По геохимическим особенностям кингашские пирротиты делятся на две группы. К первой относятся низкосернистые ($S=34,7...37,5\%$) и высокожелезистые ($\text{Fe}=62,4...64,6\%$) пирротиты. Их характерной особенностью является крайне низкие содержания (до 0,2 %) или, нередко, полное отсутствие примесей Ni. Ко второй группе относятся высокосернистые ($S=38,2...39,4\%$) и низкожелезистые ($\text{Fe}=60,0...61,2\%$) пирротиты с примесями Ni (до 1,0 %) (табл. 1).

Нередко в гипогенных условиях пирротин замещается валлериитом и магнетитом (рис. 2, з), а в гипергенных условиях – марказитом и пиритом.

Пентландит по содержанию в ультрамафитах и руде уступает пирротину. И только в рудных серпентинитах восточной части массива он является доминирующим сульфидным минералом. Минерал представлен двумя генерациями: первая (ранняя) в виде пламевидных включений в пирротине и вторая – в виде изометричных зерен и агрегатов в сростании с пирротинном и халькопиритом (рис. 2, б, е–з). Пентландит нередко образует интерстиционную вкрапленность зерен размером от 0,1 до 8 мм во вкрапленных рудах, а также отмечается в виде тонкой «сыпи» зерен размером менее 0,02 мм среди вторичных силикатов.

На диаграмме отношения S к $\text{Ni}/(\text{Ni}+\text{Fe})$ (рис. 3, б) фигуративные точки составов пентландитов образуют единый тренд, отражающий эволюцию химического состава минерала по мере дифференциации сульфидного расплава. В ультрамафитах интрузивного ряда (дунитах и верлитах) прослеживается тенденция к увеличению содержания Ni по мере уменьшения количества Fe и S, а в пикритовой серии пород – увеличение железистости и кобальтости по мере уменьшения содержания Ni (дефицит в системе) и S (рис. 3, б–в).

Высокие концентрации Ni обнаружены в пентландитах густо-вкрапленных и массивных руд халькопирит-пентландит-пирротиновой минеральной ассоциации. В целом по химизму минерал в породах Кингашского массива характеризуется повы-

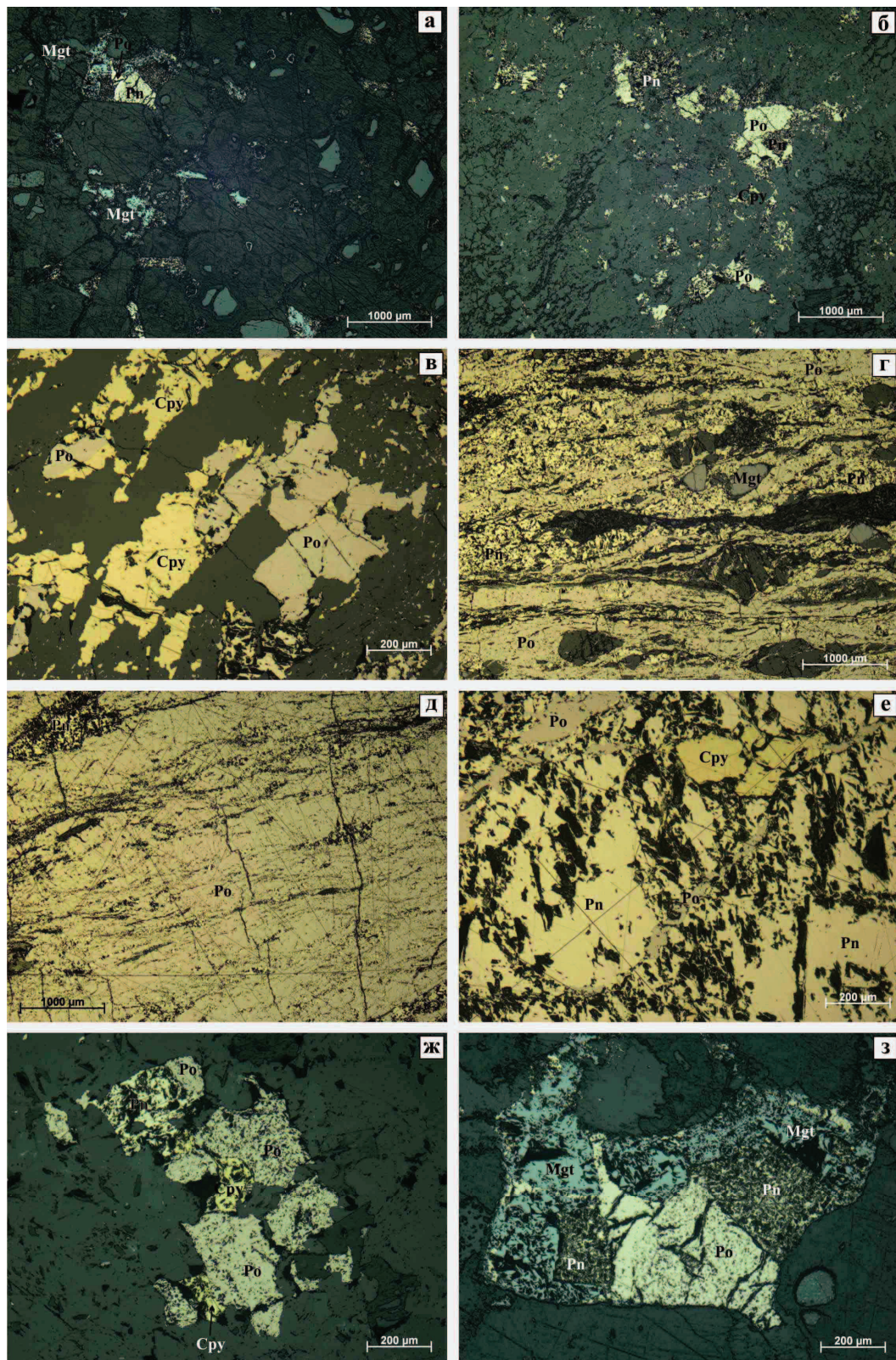


Рис. 2. Сульфидная минерализация Кингашского массива: а) интерстиционно-вкрапленные пентландит-пирротининовые руды (обр. 36A79,4-1); б, в) гнездово-вкрапленные руды: б) халькопирит-пентландит-пирротининовые (обр. PK25196,8), в) халькопирит-пирротининовые (обр. С-34Б-133,3-4); г) брекчиевидные халькопирит-пентландит-пирротининовые руды (обр. С-34Б-133,3-2); д, е) массивные (сливные) руды: д) пентландит-пирротининовые (обр. С-4Г-51.5-1), е) халькопирит-пентландит-пирротининовые (обр. С-4Г-51.5-3); ж) халькопирит-пентландит-пирротининовый парагенезис зерен (обр. С-16-175); з) пентландит-пирротининовый парагенезис зерен (обр. 36A79,4-2). Po – пирротин; Pn – пентландит; Cpy – халькопирит; Mgt – магнетит

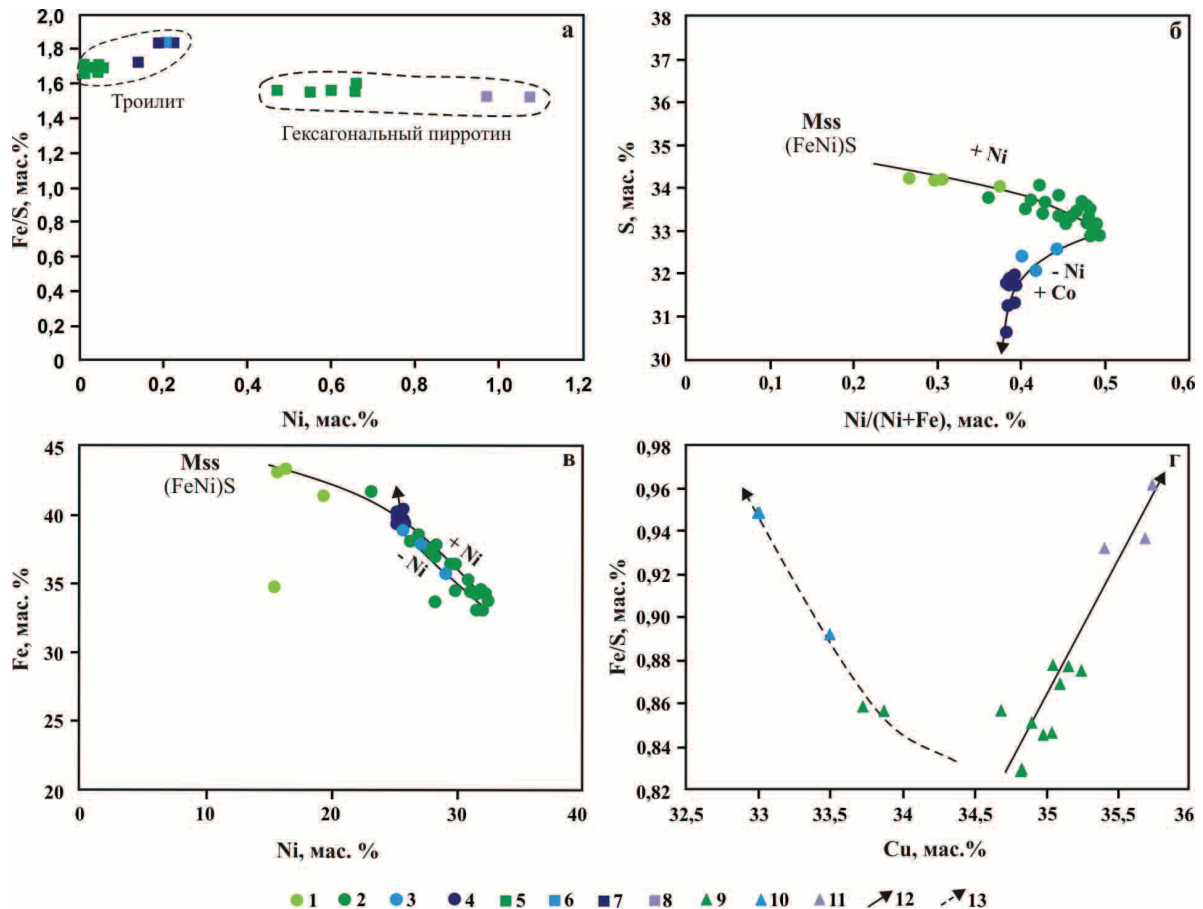


Рис. 3. Бинарные диаграммы для сульфидов из пород Кингашского массива: 1–4 – пентландиты: 1 – медистые, из дунитов, 2 – из дунитов и верлитов; 3 – из оливиновых пикритов, 4 – кобальтистые, из оливин-пироксеновых пикритов; 5–8 – пирротины: 5 – из дунитов, 6 – из оливиновых пикритов, 7 – из оливин-пироксеновых пикритов, 8 – из пироксеновых пикритов; 9–11 – халькопириты: 9 – из дунитов, 10 – из оливиновых пикритов, 11 – из пироксеновых пикритов; 12, 13 – тренды эволюции сульфидного расплава: 12 – магматический, 13 – эпимагматический

шенной железистостью (таблица). Автором в процессе изучения отмечены кобальтистый и медистый пентландиты, с содержанием Co до 10 % и Cu до 15,6 % соответственно. При этом медистый пентландит из дунитов, судя по графическим построениям (рис. 3, б, в), является наиболее ранней и высокотемпературной разновидностью пентландитов.

Пентландит часто замещается магнетитом, реже – валлериитом и макинавитом.

Халькопирит распространен незначительно, преимущественно в массивных рудах (содержание во вкрапленных рудах – до 2 % от общего объема сульфидов, в массивных рудах – до 20 %) (рис. 2, в, е, ж). Он встречается в двух морфологических формах: зерна и прожилки в сульфидах или силикатах. Размеры зерен и агрегатов обычно не более 0,2 мм. Отношение Cu/Fe в них колеблется незначительно – 1,01...1,18. В магматических халькопиритах содержание Fe снижается прямо пропорционально уменьшению концентрации Cu (рис. 3, г). На бинарной диаграмме Fe/S к Cu также отмечается эпимагматический тренд, характеризующийся снижением в химическом составе халькопиритов содержаний Cu при возрастании роли Fe. Данное

обстоятельство, очевидно, обусловлено высвобождением Cu из халькопиритов под действием метасоматоза с последующей кристаллизацией сосуществующего рядом кубанита. В качестве микропримеси в халькопирите присутствует Ni (от следов до первых процентов).

Халькопирит замещается магнетитом, валлериитом, макинавитом и ковеллином.

В породах Кингашского массива в брекчиевидных рудах нередко отмечается **кубанит**, где его содержание может достигать 10 % [10]. Он обычно находится в тесной ассоциации с халькопиритом и развивается по трещинам в сульфидах и силикатах. Размер самостоятельных зерен достигает до 0,3 мм.

Обсуждение результатов и выводы

Проведенные исследования показывают, что сульфидная минерализация пространственно связана со всеми породами Кингашского массива, но промышленные количества медно-никелевых руд с ЭПГ установлены преимущественно в дунитах.

В сульфидной ассоциации преобладают троилит, гексагональный пирротин и пентландит (до 80...90 % от общего объема сульфидов), в подчинен-

Таблица. Средний химический состав сульфидных минералов в породах Кингашского массива, мас. %

Минерал	Порода	N	S	Fe	Ni	Co	Cu	Zn	Pb
Си-пентландит	Дунит	4	33,92	39,05	16,94	0,14	9,93	–	–
Пентландит	Дунит	20	33,37	34,76	30,48	1,18	0,07	–	–
Пентландит	Ol пикрит	3	32,40	37,68	27,31	2,61	–	–	–
Со-пентландит	Дунит	2	33,84	26,48	30,14	9,55	–	–	–
Со-пентландит	Ol-Rx пикрит	7	31,57	39,63	25,29	3,51	–	–	–
Пирротин	Дунит	23	37,73	62,57	0,03	0,03	0,04	–	–
Пирротин	Ol пикрит	2	35,87	63,62	–	–	–	–	–
Пирротин	Ol-Rx пикрит	9	35,71	63,89	0,18	0,35	–	–	–
Пирротин	Rx пикрит	2	38,95	60,02	1,02	–	–	–	–
Халькопирит	Дунит	5	34,73	30,23	0,48	0,03	34,55	–	–
Халькопирит	Ol пикрит	2	34,77	31,98	–	–	33,25	–	–
Халькопирит	Rx пикрит	3	33,14	31,26	–	–	35,60	–	–
Пирит	Ol пикрит	3	53,28	46,23	–	–	–	–	–
Пирит	Rx пикрит	3	53,31	46,61	–	–	–	–	–
Пирит	Amf пикрит	3	52,75	46,73	–	0,78	–	–	–
Со-пирит	Ol пикрит	2	52,44	44,49	0,97	2,57	–	0,01	–
Макинавит	Дунит	7	36,59	57,73	4,82	0,48	0,38	–	–
Макинавит	Ol-Rx пикрит	1	36,90	57,40	3,18	2,20	–	0,11	–
Кубанит	Дунит	2	35,86	39,39	0,01	0,01	24,73	–	–
Галенит	Дунит	4	13,16	0,22	–	–	0,12	–	86,49
Галенит	Ol пикрит	1	13,47	1,78	–	–	–	–	84,75
Сфалерит	Дунит	1	35,11	9,44	0,05	0,03	1,08	54,11	0,03
Сфалерит	Ol-Rx пикрит	2	30,57	5,94	0,19	–	–	63,30	–

Примечание: Определение химического состава осуществлялось на электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega II LMU», оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск) операторами А.С. Кульковым, О.В. Бухаровой. Ol пикрит – оливиновый пикрит; Ol-Rx пикрит – оливин-пироксеновый пикрит; Rx пикрит – пироксеновый пикрит; Amf пикрит – амфиболовый пикрит; N – число анализов.

ном количестве присутствует халькопирит, крайне редко отмечается кубанит. Сульфиды железа представлены преимущественно гексагональным пирротинном и троилитом, примесь Ni в которых не превышает 1,08 % (таблица). В отдельных образцах отмечен макинавит с содержанием Ni до 4,69 % и Co до 1,0 %, а также медистый пентландит с содержанием Cu до 15,62 % (таблица). Пентландит имеет железистый состав и содержит Co до 3,8 %. Такие особенности состава сульфидной ассоциации с участием троилита, макинавита и постоянно железистый состав пентландита указывают на высокую железистость в целом кингашской рудно-магматической системы и сближает ее с медно-никелевыми месторождениями раннего протерозоя [27].

Как генетическую особенность сульфидного рудообразования Кингашского массива следует отметить относительно быстрое снижение температуры в рудно-магматической системе, что подтверждается присутствием заметного количества медистого пентландита, повышенных содержаний Ni в халькопирите, а также стехиометричностью пирротина и пентландита по их химическому составу. В пользу быстрого охлаждения сульфидного расплава свидетельствует и состав минералов платиновой группы: большинство их содержит примеси тяжелых ЭПГ (Os, Ir, Rh, Ru) [11, 12], что свидетельствует об отсутствии «разгонки» платиновых металлов, характерной для многих месторождений. Данный вывод подтверждает ранее высказан-

ное предположение В.Н. Князева и опровергает точку зрения о медленном остывании сульфидного расплава Т.А. Радомской.

Помимо этого состав сульфидной минерализации массива свидетельствует о ее кристаллизации из высокотемпературного сульфидного расплава без значительного его фракционирования в процессе высокой скорости транспортировки магмы из мантийного очага в верхние этажи литосферы. Данное утверждение хорошо согласуется с установленной для Кингашского массива геодинамической обстановкой формирования – в условиях океанического рифта [24]. Подобная обстановка обеспечивала благоприятные условия для быстрой транспортировки ультраосновной магмы от мантийного очага образования к поверхности [28].

Типоморфные особенности и химический состав сульфидных минералов, их соотношение и парагенезис позволяют предполагать два этапа в формировании отмеченной минерализации (магматический и низкотемпературный эпимагматический), а также реконструировать эволюцию сульфидного расплава по мере кристаллизации пород массива.

По наблюдениям автора вкрапленная пирротин-пентландит-халькопиритовая минерализация в ультрамафитах является первично-магматической. Образование сульфидной триады, очевидно, происходило из сульфидного расплава, обогащенного железом, который в процессе ликвации выде-

лился из исходной высокомагнезиальной пикритовой магмы. Такой моносльфидный твердый раствор (Mss) в условиях высоких температур растворяет весь содержащийся никель и является гомогенным. При понижении температуры из него происходит близкая по времени кристаллизация пирротина и железистого пентландита, с образованием структур распада твердых растворов [29]. Данное предположение подтверждается анализом химических составов этих минералов.

Одновременно с кристаллизацией основных порообразующих силикатных минералов в магматическую стадию происходит сегрегация высокотемпературных Fe-Ni сульфидов, которые в виде сульфидных капель обнаружены в силикатной матрице. Этому процессу способствует присутствие в расплаве S, P и летучих компонентов (F, H₂O, Cl) [13]. При этом постепенно во фракционирующем сульфидном расплаве концентрируется и обособляется Cu и Ni. Накопление первого в итоге приводит к кристаллизации фаз халькопирита, как в составе триады, так и в виде самостоятельных зерен; а Ni – к возрастанию его роли в кристаллизующихся зернах пентландита и пирротина.

Концентрация сульфидных капель в дунитах придонной части массива при участии механизма ликвации и под действием силы гравитации (транспортно-гравитационная модель накопления сульфидов) [27] приводит к появлению густо вкрапленных богатых Cu-Ni руд.

Сульфидная минерализация в породах пикритовой серии (оливиновых и оливин-пироксеновых пи-

критях) представлена в основном каплевидными пирротин-пентландитовыми включениями, причем, в последних эта минерализация более частая и достигает до 7...8 % от объема породы. Пониженное содержание Ni в пентландах из оливиновых пикритов по отношению к пентландам из дунитов и верлитов и последующее уменьшение его содержания в пентландах из оливин-пироксеновых пикритов, вероятно, указывает на дефицит данного элемента в сульфидной системе. Данный факт, очевидно, является следствием значительного поглощения Ni при кристаллизации более ранних дифференциатов – кумулятивных дунитов. В сульфидном производном расплаве, образовавшемся при кристаллизации пикритов, происходит возрастание в системе роли Co, который изоморфно восполняет «нехватку» Ni. При этом образуются высококобальтовые пентландиты, которые формируются при кристаллизации оливиновых и оливин-пироксеновых пикритов. В поздних наиболее дифференцированных пироксеновых и амфиболовых пикритах они отсутствуют, однако из остаточного сульфидного расплава происходила кристаллизация самостоятельных зерен халькопирита и пирита.

Брекчиево-жильные и массивные пентландит-халькопирит-кубанит-пирротиновые руды, крупные халькопиритовые и пиритовые агрегативные выделения, макинавит, сфалерит и галенит формировались в эпимагматический этап, когда сульфидная жидкость под действием процессов метасоматоза интродировала по зонам трещиноватости в породах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платиноносность ультрабазит-базитовых комплексов Юга Сибири / под ред. В.И. Богникова, А.П. Кривенко, А.Э. Исоха и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 1995. – 151 с.
2. Юричев А.Н. Мафит-ультрамафитовый магматизм Канской глыбы и его рудный потенциал, Северо-Запад Восточного Саяна // Руды и металлы. – 2013. – № 3. – С. 11–20.
3. Юричев А.Н., Чернышов А.И., Конников Э.Г. Талажинский плагиодунит-троктолит-анортозит-габбровый массив Восточного Саяна: петрогеохимические особенности и проблемы рудоносности // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 2. – С. 219–236.
4. Юричев А.Н., Чернышов А.И. Рудная минерализация идарского дунит-гарцбургитового комплекса (Северо-Запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 69–75.
5. Чернышов А.И., Ножкин А.Д., Мишенина М.А. Петрохимическая типизация ультрамафитов Канского блока (Восточный Саян) // Геохимия. – 2010. – № 2. – С. 1–25.
6. Юричев А.Н. Кулибинский и нижнедербинский комплексы: общность геохимических черт (северо-запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 123–129.
7. Юричев А.Н., Чернышов А.И. Рудная минерализация перидотитов и габброидов кулибинского комплекса (северо-запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 64–70.
8. Чернышов А.И., Мишенина М.А. Петроструктурная типизация ультрамафитов Канского зеленокаменного пояса (северо-запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 19–24.
9. Глазунов О.М., Богнибов В.И., Еханин А.Г. Кингашское платиноидно-медно-никелевое месторождение. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2003. – 192 с.
10. Князев В.Н. Геология и условия образования благороднометаллового и медно-никелевого оруденения Канского зеленокаменного пояса (Восточный Саян): дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. – Красноярск, 2004. – 145 с.
11. Минералогия и платиноносность медно-никелевых руд Кингашского массива (Восточный Саян) / Г.И. Шведов, А.В. Тарасов, В.В. Некос, В.Н. Князев // Золото, платина и алмазы Республики Коми и сопредельных регионов. – Сыктывкар: Геопринт, 1998. – С. 106.
12. Минералы элементов платиновой группы в сульфидных медно-никелевых рудах Кингашского массива (Восточный Саян) / Г.И. Шведов, Н.Д. Толстых, В.В. Некос, Л.Н. Поспелова // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 11. – С. 1842–1848.
13. Радомская Т.А. Минералогия и геохимия Кингашского платиноидно-медно-никелевого месторождения (В. Саян): автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. – Иркутск, 2012. – 23 с.
14. Коматииты и высокомагнезиальные вулканы раннего докембрия Балтийского щита. – Л.: Наука, 1988. – 192 с.
15. Гертнер И.Ф., Врублевский В.В., Глазунов О.М. и др. Возраст и природа вещества Кингашского ультрамафит-мафитового массива, Восточный Саян // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 429. – № 5. – С. 645–651.
16. Корнев Т.Я., Еханин А.Г. Эталон Кингашского базальт-коматиитового комплекса (Восточный Саян). – Новосибирск: СНИИГТМиС, 1997. – 88 с.
17. Петрографические особенности ультрамафитов Кингашского Cu-Ni-Pt-месторождения (СЗ Восточного Саяна) / А.И. Черны-

- шов, Н.И. Кузоватов, И.Г. Резников, Н.А. Третьяков, С.И. Ступаков // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Матер. Всеросс. науч. конф. Вып. 2. – Томск, 2001. – С. 266–280.
18. Геологическое положение Кингашского ультрамафитового массива в структурах Восточного Саяна и его внутреннее строение / А.И. Чернышов, А.Д. Ножкин, И.Г. Резников, Н.А. Третьяков, Н.И. Кузоватов // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Матер. Всеросс. науч. конф. – Томск, 2002. – Вып. 3. – С. 141–150.
 19. Кингашский мафит-ультрамафитовый массив: геологическое положение, внутреннее строение, вещественный состав и петроструктурный анализ ультрамафитов (Восточный Саян) / А.И. Чернышов, А.Д. Ножкин, С.И. Ступаков, П.А. Балыкин, Н.И. Кузоватов, И.Г. Резников, Н.А. Третьяков, В.А. Прохорова // Платина России. Проблемы развития, оценки воспроизводства и комплексного использования минерально-сырьевой базы платиновых металлов. Т. V. – М.: ООО «Геоинформ-марк», 2004. – С. 152–175.
 20. Сульфидно-никелевое и благороднометалльное оруденение в гранит-зеленокаменной области Восточного Саяна / А.Д. Ножкин, М.Ю. Цыпуков, В.А. Попереков, А.Н. Смагин, А.В. Ренжин // Отечественная геология. – 1995. – № 6. – С. 11–17.
 21. Коматит-базальтовая ассоциация Канского зеленокаменного пояса (Восточный Саян) / М.Ю. Цыпуков, А.Д. Ножкин, В.А. Бобров, Ю.Г. Шилицын // Геология и геофизика. – 1993. – № 8. – С. 98–108.
 22. Канский зеленокаменный пояс и его металлогения (Восточный Саян) / Т.Я. Корнев, А.Г. Еханян, А.П. Романов, В.Н. Князев. – Красноярск: КНИИГиМС, 2003. – 134 с.
 23. Амфиболит-гнейсовые комплексы зеленокаменных поясов Канской глыбы: геохимия, реконструкция протолитов и условий их образования (Восточный Саян) / А.Д. Ножкин, О.М. Туркина, В.А. Бобров, А.Д. Киреев // Геология и геофизика. – 1996. – № 12. – С. 30–41.
 24. Глазунов О.М. Перспективы расширения минерально-сырьевой базы цветных металлов в Саянской никель-платиноносной провинции // Минерально-сырьевая база цветных металлов: Труды I Междунар. конгресса. – Красноярск, 2009. – С. 19–24.
 25. Reed S.J.B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. – N.Y.: Cambridge University Press, 2005. – 189 p.
 26. Taylor C.M., Radtke A.S. Preparation and polishing of ores and mill products for microscopic examination and electron microprobe analysis // Econ. Geol. – 1965. – № 65. – P. 1306–1319.
 27. Налдретт А.Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометаллических руд. – СПб.: СПбГУ, 2003. – 487 с.
 28. Налдретт А.Дж. Геологические обстановки, благоприятные для нахождения магматических сульфидных руд // Руды и металлы. – 2002. – № 5. – С. 33–47.
 29. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. – М.: Иностран. лит-ра, 1962. – 1132 с.

Поступила 14.10.2013 г.

UDC 552.321.6:553.08

EVOLUTION OF SULFIDE LIQUID AT KINGASHSKY ULTRAMAFIC MASSIF FORMATION (NORTH-WEST OF EASTERN SAYAN)

Alexey N. Yurichev,

Cand. Sc., Tomsk State University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 36. E-mail: juratur@sibmail.com

The study subject of the paper is the sulphide mineralization of rocks of the Kingashsky dunite-wehrlite-picritic massif, which is the standard of an object of ultramafic complex in the Kan block (north-western part of the Eastern Sayan) with the same name and which includes eponymous large Cu-Ni deposit with PGE. Despite the increased interest of many researchers to the massif, a number of issues on its petrological nature and mechanisms of formation and localization of Pt-Cu-Ni ores in it are still controversial. The paper attempts to trace the evolution of the material composition of sulfide melt at formation of the massif rocks and their subsequent metamorphic changes. The paper introduces typomorphism, mineral and chemical composition of sulfide minerals. The carried out studies show that sulphide mineralization is spatially associated with all breeds of Kingashsky array, but the ore industrial amounts are mainly found out in dunites. The features of sulfide association indicate high iron index in Kingashskaya ore-magmatic system as a whole and brings it closer to the copper-nickel deposits of the Early Proterozoic. The genetic feature of sulfide mineralization of the Kingashsky massif is relatively rapid temperature decrease of sulfide melt without its significant fractionation at high rate of magma transportation from the magmatic chamber into the upper floors of the lithosphere. Typomorphic characteristics and chemical composition of sulfide minerals, their relationship and paragenesis allowed supposing two stages in formation of the noted mineralization (magmatic and low temperature epimagmatic) as well as reconstructing the evolution of sulfide melt when crystallizing massif rocks.

Key words:

Kingashsky massif, ultramafites, sulfide mineralization, chemistry, evolution of liquid.

REFERENCES

1. Platinonost ulrabazit-bazitovykh kompleksov Yuga Sibiri [PGE mafic-ultramafic complexes of South Siberia]. Ed. by V.I. Bognibov, A.P. Krivenko, A.E. Izokh. Novosibirsk, SO RAN, GEO Publ., 1995. 151 p.
2. Yurichev A.N. Mafit-ultramafitovy magmatizm Kanskoj glyby i ego rudny potentsial, Severo-Zapad Vostochnogo Sayana [Mafic-ultramafic magmatism of Kan block and its ore potential, North-west Eastern Sayan]. *Rudy i metally*, 2013, no. 3, pp. 11–20.
3. Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Konnikov E.G. Talazhinskiy plagioudit-troktolit-anortozit-gabbrovyy massiv Vostochnogo Sayana: petrogeokhimicheskie osobennosti i problemy rudonosti [The Talazhin plagioudite-troctolite-anorthosite-gabbro massif (East Sayan): petrogeochemistry and ore potential]. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 2, pp. 219–236.

4. Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Rudnaya mineralizatsiya idarskogo dunit-garzburgitovogo kompleksa (Severo-Zapad Vostochnogo Sayana) [Ore mineralization of the Idarsky dunite-harzburgite complex (North-west Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 69–75.
5. Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Mishenina M.A. Petrokhimicheskaya tipizatsiya ultramafitov Kanskogo bloka (Vostochny Sayan) [Petrogeochemical typification of the ultramafic rocks from the Idar greenstone belt, Kan block, East Sayan]. *Geochemistry International*, 2010, no. 2, pp. 1–25.
6. Yurichev A.N. Kulibinskiy i nizhnederbinskiy komplekсы: obshchnost geokhimicheskikh chert (severo-zapad Vostochnogo Sayana) [Kulibinsky and nizhnederbinskiy complexes: common geochemical features (North-west of the Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 123–129.
7. Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Rudnaya mineralizatsiya peridotitov i gabbroidov kulibinskogo kompleksa (severo-zapad Vostochnogo Sayana) [Ore mineralization of peridotites and gabbros of the Kulibinsky complex (North-west of the Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 64–70.
8. Chernyshov A.I., Mishenina M.A. Petrostrukturnaya tipizatsiya ultramafitov Kanskogo zelenokamennogo poyasa (severo-zapad Vostochnogo Sayana) [Petrostructural typification of ultramafites of the Kan greenstone belt (North-west of the Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 19–24.
9. Glazunov O.M., Boghibov V.I., Ekhanin A.G. Kingashskoe platino-medno-nikelevoe mestorozhdenie [Kingashsky PGE-copper-nickel deposit]. Irkutsk, IGTU Publ., 2003. 192 p.
10. Knyazev V.N. *Geologiya i usloviya obrazovaniya blagorodnometalnogo i medno-nikelevogo orudeneniya Kanskogo zelenokamennogo poyasa (Vostochny Sayan)*. Diss. Kand. Geologo-mineralogicheskikh nauk [Geology and formation conditions of noble metal and copper-nickel mineralization of the Kan greenstone belt (Eastern Sayan). Cand. Diss.]. Krasnoyarsk, 2004. 145 p.
11. Shvedov G.I., Tarasov A.V., Nekos V.V., Knyazev V.N. Mineralogiya i platinonosnost medno-nikelevykh rud Kingashskogo massiva (Vostochny Sayan) [Mineralogy and platinum-bearing of copper-nickel ores of the Kingashsky massif (Eastern Sayan)]. *Zoloto, platina i almazy Respubliki Komi i soprodelnykh regionov* [Gold, platinum and diamonds of the Komi Republic and contiguous regions]. Syktyvkar, Geoprint Publ., 1998. p. 106.
12. Shvedov G.I., Tolstykh N.D., Nekos V.V., Pospelova L.N. Mineraly elementov platinovoy gruppy v sulfidnykh medno-nikelevykh rudakh Kingashskogo massiva (Vostochny Sayan) [Minerals of platinum group elements in copper-nickel sulfide ores of the Kingashsky massif (Eastern Sayan)]. *Russian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 11, pp. 1842–1848.
13. Radomskaia T.A. *Mineralogiya i geokhimiya Kingashskogo platino-medno-nikelevogo mestorozhdeniya (V. Sayan)*. Avtoref. Diss. Kand. Geologo-mineralogicheskikh nauk [Mineralogy and geochemistry of the Kingashsky PGE-copper-nickel deposit (E. Sayan). Cand. Diss. abstract]. Irkutsk, 2012. 23 p.
14. Komatiiti i vysokomagnezialnye vulkanity rannego dokembriya Baltiyskogo shchita [Komatiites and high-Mg volcanic rocks of the Early Precambrian of the Baltic Shield]. Leningrad, Nauka, 1988. 192 p.
15. Gertner I.F., Vrublevskiy V.V., Glazunov O.M. Vozrast i priroda veshchestva Kingashskogo ultramafit-mafitovogo massiva, Vostochny Sayan [Age and nature of matter of the Kingashsky ultramafic-mafic massif, East Sayan]. *Doklady Akademii nauk*, 2009, vol. 429, no. 5, pp. 645–651.
16. Kornev T.Ya., Ekhanin A.G. *Etalon Kingashskogo bazalt-komatiitovogo kompleksa (Vostochny Sayan)* [Etalon of the kingashsky basalt-komatiitic complex (East Sayan)]. Novosibirsk, SNIIG-GiMS, 1997. 88 p.
17. Chernyshov A.I., Kuzovatov N.I., Reznikov I.G., Tretyakov N.A., Stupakov S.I. Petrograficheskie osobennosti ultramafitov Kingashskogo Cu-Ni-Pt-mestorozhdeniya (SZ Vostochnogo Sayana) [Petrographic features of ultramafites of the Kingashsky Cu-Ni-Pt deposit (NW Eastern Sayan)]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Proc. All-Russian scientific conference]. Tomsk, 2001, Iss. 2, pp. 266–280.
18. Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Reznikov I.G., Tretyakov N.A., Kuzovatov N.I. Geologicheskoe polozhenie Kingashskogo ultramafitovogo massiva v strukturakh Vostochnogo Sayana i ego vnutrennee stroenie [Geological position of the Kingashsky ultramafic massif in the structures of the Eastern Sayan and its internal structure]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Proc. All-Russian scientific conference]. Tomsk, 2002, Iss. 3, pp. 141–150.
19. Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Stupakov S.I., Balykin P.A., Kuzovatov N.I., Reznikov I.G., Tretyakov N.A., Prokhorova V.A. Kingashskiy mafit-ultramafitovy massiv: geologicheskoe polozhenie, vnutrennee stroenie, veshchestvenny sostav i petrostrukturny analiz ultramafitov (Vostochny Sayan) [Kingashsky mafic-ultramafic massif: geological position, internal structure, material composition analysis and petrostructural analysis of ultramafic (Eastern Sayan)]. *Platina Rossii. Problemy razvitiya, otsenki vosproizvodstva i kompleksnogo ispolzovaniya mineralno-syrevoy bazy platinovykh metallov* [Platinum of Russia. Problems of development, evaluation of reproduction and complex use of mineral resources base of the platinum metals]. Moscow, 2004, vol. V, pp. 152–175.
20. Nozhkin A.D., Tsypukov M.Yu., Poperekov V.A., Smagin A.N., Renzhin A.V. Sulfidno-nikelevoe i blagorodnometalnoe orudenenie v granit-zelenokamennoy oblasti Vostochnogo Sayana [Sulfide-nickel and noble-metal mineralization in the granite-greenstone field of the Eastern Sayan]. *Otechestvennaya geologiya*, 1995, no. 6, pp. 11–17.
21. Tsypukov M.Yu., Nozhkin A.D., Bobrov V.A., Shipitsyn Yu.G. Komatiit-bazaltovaya assotsiatsiya Kanskogo zelenokamennogo poyasa (Vostochny Sayan) [Komatiite-basalt association of the Kan greenstone belt (Eastern Sayan)]. *Russian Geology and Geophysics*, 1993, no. 8, pp. 98–108.
22. Kornev T.Ya., Ekhanin A.G., Romanov A.P., Knyazev V.N. *Kanskiy zelenokamenny poyas i ego metallogeniya (Vostochny Sayan)* [Kan greenstone belt and its metallogeny (Eastern Sayan)]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Publ., 2003. 134 p.
23. Nozhkin A.D., Turkina O.M., Bobrov V.A., Kireev A.D. Amfibolit-gneysovyye komplekсы zelenokamennykh poyasov Kanskoy glyby: geokhimiya, rekonstruktsiya protolitov i usloviy ikh obrazovaniya (Vostochny Sayan) [Amphibolite-gneiss complexes of greenstone belts of the Kan block: geochemistry, reconstruction protolith and conditions of their formation (Eastern Sayan)]. *Russian Geology and Geophysics*, 1996, no. 12, pp. 30–41.
24. Glazunov O.M. Perspektivy rasshireniya mineralno-syrevoy bazy tsvetnykh metallov v Sayanskoy nikel-platinosnoy provintsii [Prospects for expanding mineral resource base nonferrous metals in Sayan nickel-platinum province]. *Mineralno-syrevaia baza tsvetnykh metallov. Trudy I Mezhdunarodnogo kongressa* [Mineral resource base. Proc. I International congress]. Krasnoyarsk, 2009, pp. 19–24.
25. Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. N.Y., Cambridge University Press, 2005. 189 p.
26. Taylor C.M., Radtke A.S. Preparation and polishing of ores and mill products for microscopic examination and electron microprobe analysis. *Econ. Geol.*, 1965, no. 65, pp. 1306–1319.
27. Naldrett A.Dzh. *Magmaticheskie sulfidnye mestorozhdeniya medno-nikelevykh i platinometalnykh rud* [Magmatic sulfide deposits of copper-nickel and PGE ores]. Saint-Petersburg, SpbGU Publ., 2003. 487 p.
28. Naldrett A.Dzh. Geologicheskie obstanovki, blagopriyatnye dlya nakhozhdeniya magmaticheskikh sulfidnykh rud [Geological conditions favorable for finding magmatic sulfide ores]. *Rudy i metall*, 2002, no. 5, pp. 33–47.
29. Ramdor P. *Rudnye mineraly i ikh srastaniya* [Ore minerals and their intergrowths]. Moscow, Inostr. literatura, 1962. 1132 p.

УДК 553.98;571.12

ГЕНЕЗИС ДОЮРСКИХ ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ РОГОЖНИКОВСКОЙ ГРУППЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПО ДАННЫМ ГРАВИРАЗВЕДКИ И ГЕОХИМИИ (ТЮМЕНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Лобова Галина Анатольевна,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геофизики
Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: lobovaga@tpu.ru

Коржов Юрий Владимирович,

канд. хим. наук, доцент кафедры геологии Института природопользования
Югорского государственного университета,
Россия, 628012, Тюменская область, ХМАО-Югра, г. Ханты-Мансийск,
ул. Чехова, 16. E-mail: ykor1962@mail.ru

Кудряшова Лидия Константиновна,

аспирант, ассистент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых
Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: lidiya3107@yandex.ru

Установление «главного источника» углеводородов доюрского нефтегазоносного комплекса определяет генезис залежей нефти в доюрском основании Западной Сибири а, следовательно, стратегию и основы технологии поисков.

Цель работы – информировать специалистов об авторских результатах применения гравirazведки и геохимического опробования в пределах Рогожниковского лицензионного участка (Красноленинский свод), признанного в качестве «эталона» для исследований по проблеме «главного источника».

Методы исследования: комплексная интерпретация данных сейсморазведки, гравirazведки и бурения на основе геоплотностного моделирования, нефтегеологическая интерпретация «зон разуплотнения», послойный анализ керна продуктивных, над- и подпродуктивных отложений на содержание и молекулярно-массовое распределение нефтяных углеводородов методами органической геохимии.

В результате исследований на траверсе Рогожниковского лицензионного участка выявлена зона разуплотнения доюрского комплекса пород, отождествляемая с вторичными коллекторами. Установлена вертикальная миграция нефтяных углеводородов из юрской зоны генерации в доюрские разуплотненные породы. Подтверждается юрская концепция «главного источника». Первоочередными участками поисков определяются территории сосредоточения уже известных залежей в нижних этажах осадочного чехла. Надежным и недорогим методом выявления зон разуплотнения в фундаменте рекомендуется геоплотностное моделирование.

Ключевые слова:

Доюрское основание, геоплотностное моделирование, вторичные резервуары, геохимические исследования керна, вертикальная миграция, генезис нефти, Красноленинский свод.

Введение

Рогожниковский лицензионный участок (ЛУ), включающий Рогожниковскую группу месторождений в пределах Красноленинского свода (рис. 1), предложен А.Т. Коровиной и др. [1] как полигон для определения перспектив нефтегазоносности доюрских отложений, для «разработки системных подходов», апробации критериев и концепций поисков. На Рогожниковском ЛУ пробурено более 100 скважин, вскрывших доюрские отложения, треть из которых являются коллекторами. Из кислых вулканитов доюрского комплекса и терригенных отложений триаса начата опытно-промышленная добыча нефти.

Цель настоящей статьи – информировать специалистов об авторских результатах применения данных гравirazведки и геохимии на Красноленинском своде, где расположен Рогожниковский ЛУ. Данные гравirazведки применены для выявления в доюрском основании зон разуплотнения, а данные геохимии – для определения источника нефтяных углеводородов в доюрском комплексе пород.

Гравirazведка для выявления зон разуплотнения в доюрском основании

В 2005 г. выполнено геоплотностное моделирование вдоль регионального сейсмопрофиля XIII, пересекающего Западно-Сибирскую плиту с востока на запад на широте 62° [2]. Это одно из широтных направлений сети региональных сейсмических исследований МОГТ, отработанных на территории ХМАО в 1972–2002 гг. Для геоплотностного моделирования использованы структурные карты по кровле юрских (ошибка ±25 м) и доюрских (ошибка ±50 м) отложений, аномалии силы тяжести в редукции Граафа-Хантера (ошибка ±0,6 мГал), а также стратиграфические разбивки «реперных» скважин, вскрывших доюрские отложения, и литологическое описание керна.

В западной части моделируемый геотраверс включает Красноленинский свод (рис. 1). На траверсе Красноленинского свода выявлены (рис. 2): зона разуплотнения меловых отложений, разуплотнения кровли доюрских отложений и в целом крупная обособленная зона разуплотнения доюрского комплекса.

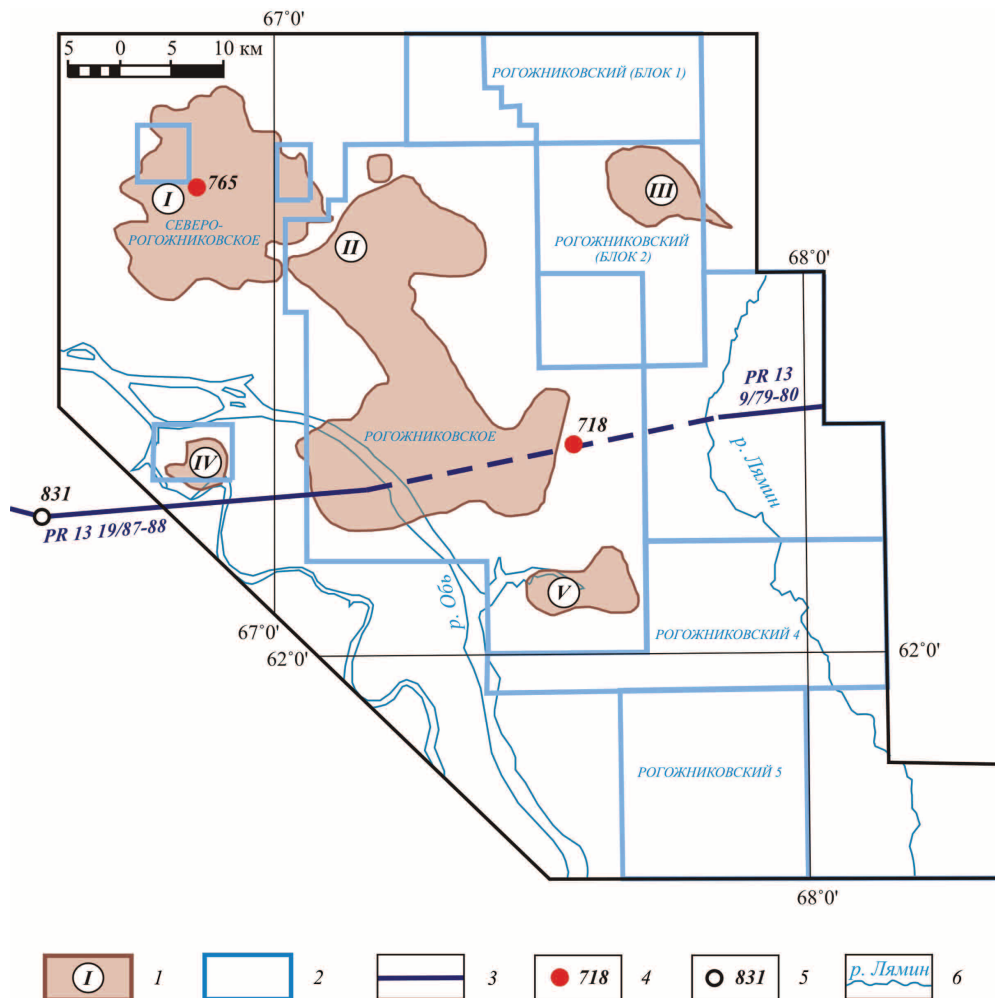


Рис. 1. Схема размещения Рогожниковской группы месторождений Красноленинского свода: 1) месторождение УВ и его условный номер (I – Северо-Рогожниковское, II – Рогожниковское, III – Восточно-Рогожниковское, IV – Западно-Рогожниковское, V – Южно-Рогожниковское); 2) контур лицензионного участка (ЛУ); 3) региональный сейсмический профиль (профиль геоплотностного моделирования); 4) исследуемые скважины и их номера; 5) «реперная» скважина при геоплотностном моделировании; 6) речная сеть

Интерпретация геоплотностной модели на участке Красноленинского свода (рис. 3) была выполнена следующим образом: «Над зоной разуплотнения всего доюрского комплекса северо-восточной части Красноленинского свода находится Рогожниковское нефтяное месторождение с залежами почти во всех нефтегазоносных комплексах (НГК) юры и неокома. Основным источником нефти этих залежей являются материнские породы баженовской свиты (bg) – J_3t-K_1b-br . По глубине положения баженовская свита вошла в «нефтяное окно». Разуплотненная структура послепермских отложений способствовала миграции нефти в ловушки викуловской свиты ($ВК_1$) – K_1a . Непосредственное примыкание к материнским отложениям пластов абалакской свиты (пласт $Ю_1^0$) – J_3o-km и верхней подсвиты тюменской свиты (пласт $Ю_2$) – J_2bt способствовало миграции нефти в ловушки этих пластов. Отсутствие нижнеюрских отложений позволило нефти мигрировать в ловушки зоны

контакта осадочного чехла и фундамента (Т). Масштабная зона разуплотнения доюрского комплекса на участке Рогожниковского вала представляется нам сосредоточением резервуаров и генерирующих толщ (подводящих каналов?) в слабометаморфизованных палеозойских терригенно-карбонатных породах (D–C) или в трещиновато-кавернозных магматических породах (Т). *Здесь резерв расширения ресурсной базы Красноленинского нефтегазоносного района с нефтяными, газоконденсатными и газовыми залежами в доюрском разрезе на глубинах 2,5...4,5 км» [3].*

Можно констатировать, что зона разуплотнения в доюрском основании, выявленная геоплотностным моделированием по данным сейсморазведки и гравиразведки, и последующее интерпретационное заключение о сосредоточении резервуаров в доюрских отложениях вполне согласуются с результатами геологоразведочных работ на Рогожниковском ЛУ.

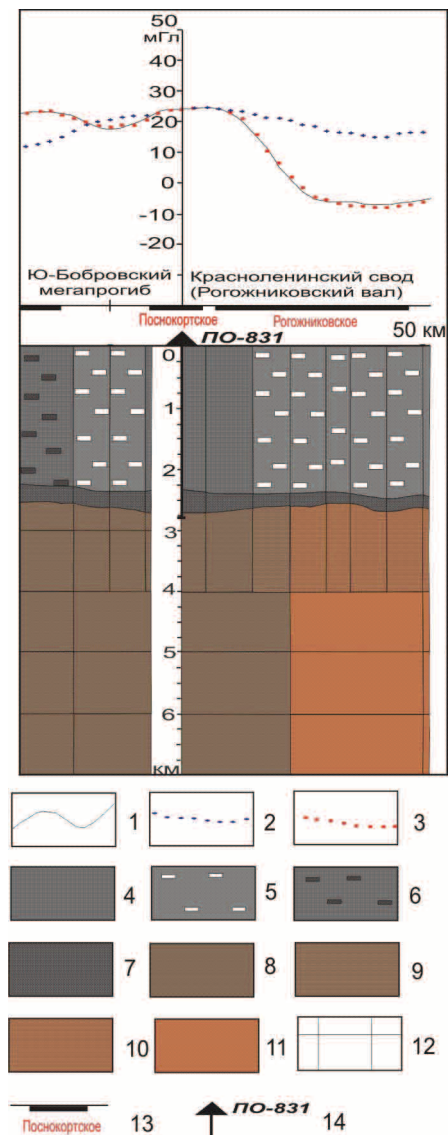


Рис. 2. Фрагмент геоплотностной модели вдоль траверса Краснolenнинский свод – Ляпинский мегапрогиб [3]: графики силы тяжести 1) наблюдаемого поля, 2) априорного разреза, 3) расчетного разреза; 4) послеледниковые отложения; 5) разуплотнения послеледниковых отложений, до $0,05 \text{ г/см}^3$; 6) уплотнения послеледниковых отложений, до $0,05 \text{ г/см}^3$; 7) юрские отложения; 8) доюрские отложения; 9–11) разуплотнения доюрских отложений до $0,05$, на $0,05...0,10$ и $0,10...0,15 \text{ г/см}^3$, соответственно; 12) блокировка разреза при моделировании; 13) месторождение УВ и его название; 14) «реперная» скважина

Геохимия для определения источника нефтяных углеводородов в доюрском комплексе пород

Установление перемещения УВ-флюидов от «источника» (материнских пород, залежи) в вышележащие и нижележащие отложения выполнено [4] на основе детального послойного изучения над- и подпродуктивных отложений, вскрытых разведочными скважинами (рис. 1), на содержание и молекулярно-массовое распределение (ММР) компонентов.

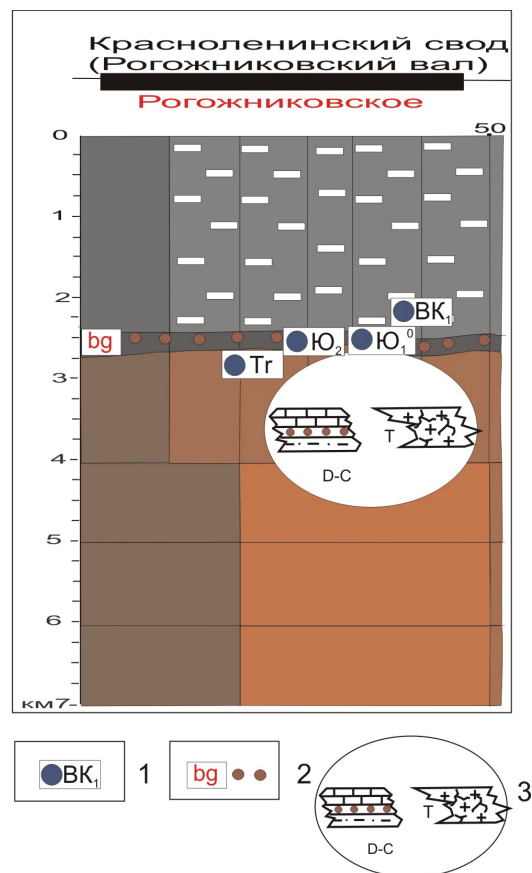
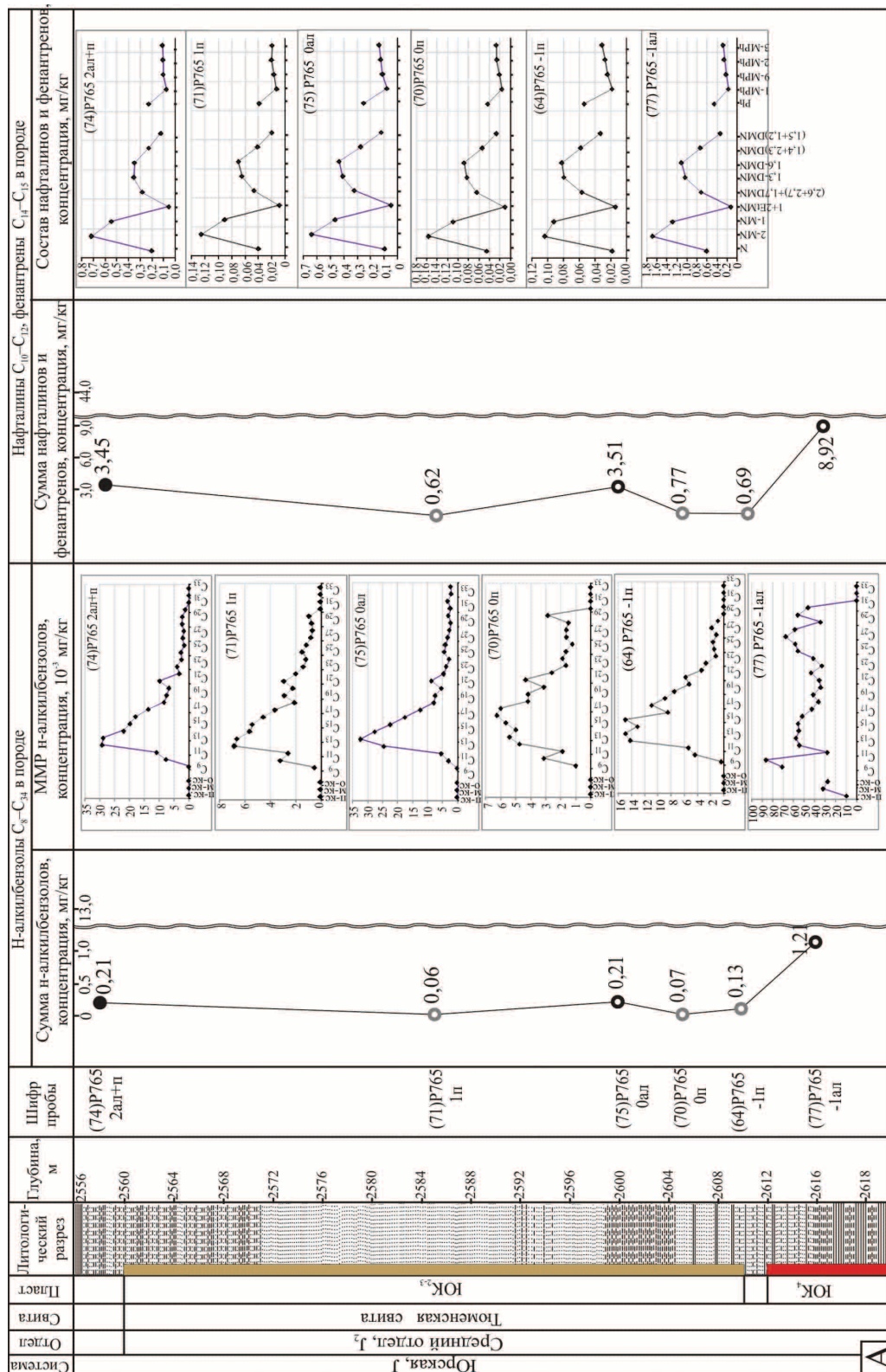


Рис. 3. Схема нефтегеологической интерпретации геоплотностной модели на участке Краснolenнинского свода [3]: 1) нефтеносные комплексы; 2) материнские отложения; 3) прогнозируемая зона нефтегазоаккумуляции и ее литолого-петрографическая интерпретация с качественной оценкой генерационного потенциала. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 2

В разрезе скважин к нефтематеринским толщам, активно реализующим свой генерационный потенциал, по содержанию и распределению УВ отнесены нижняя часть тюменской свиты и тутлеймские (баженовские) аргиллиты. Распределение нефтяных (ароматических) УВ в разрезе среднеюрских и доюрских отложений скважины Северо-Рогожниковская 765 представлено на рис. 4.

В нижней части юры характерно однотипное распределение циркулирующих по пластам изомеров и гомологов нафталинов и фенантронов с повышенным содержанием 2-метил- и 1,6-диметилнафталинов (рис. 4, А). Исследованный из низов тюменских отложений алевролит характеризуется широким (нефтяным) распределением н-алканов $C_{10}-C_{33}$ с максимумом, приходящимся на $C_{14}-C_{19}$, н-алкилбензолов $C_{10}-C_{30}$ с максимумом на C_{13-22} , пониженным содержанием легких гомологов C_{9-11} и относительно высоким (1,17–1,49) индексом СРІ н-алканов [5]. В соседних с ним вышележащих образцах песчаника и алевролита средней части тюменской свиты фиксируются углеводороды облегченного молекулярного состава C_{9-21} . Эти легкие,



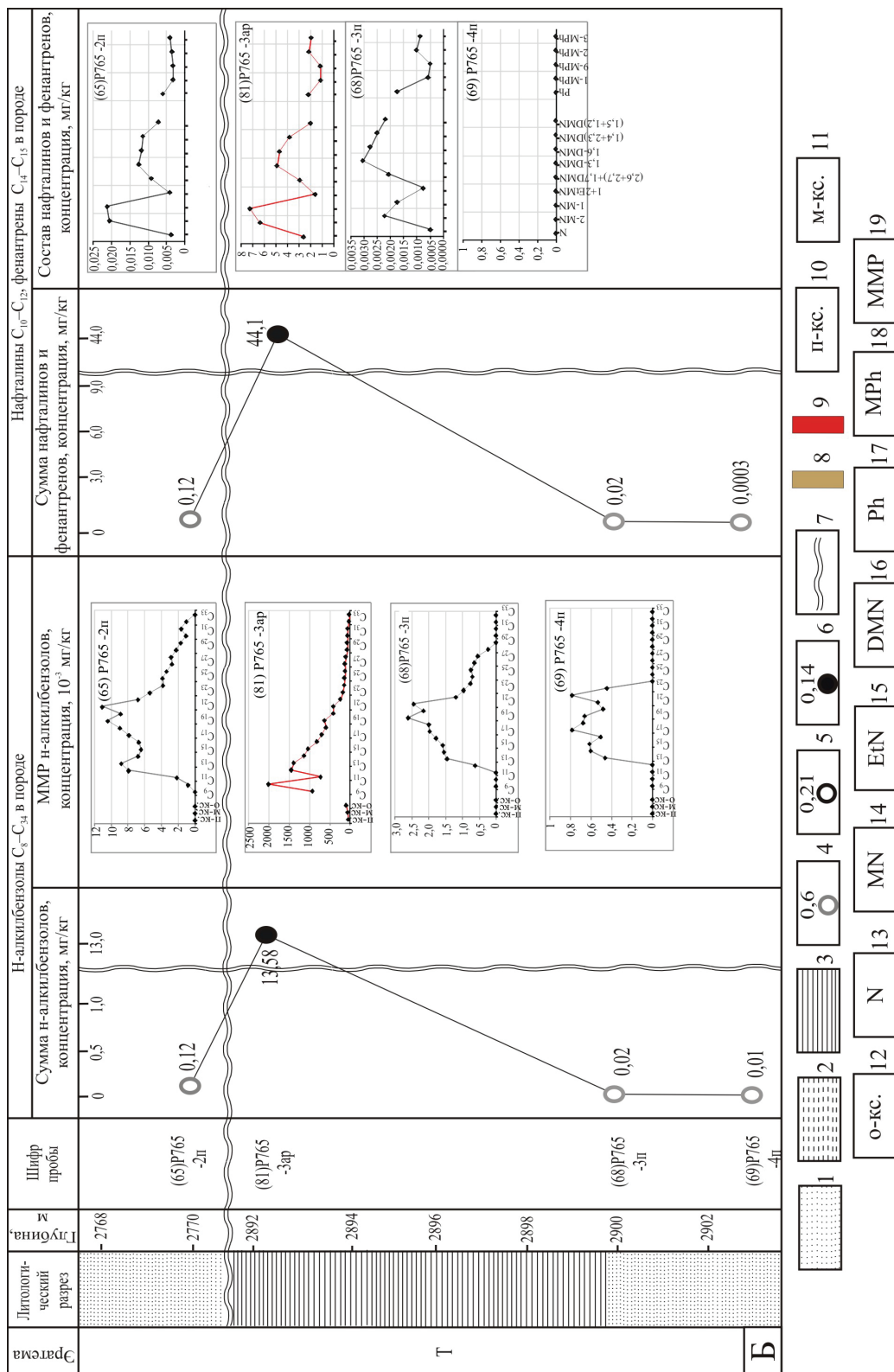


Рис. 4. Распределение ароматических углеводородов в разрезе среднеюрских (А) и триасовых (Б) отложений скважины Северо-Рогожниковская 765 (фрагмент из [4]): 1) песчаник; 2) алевролит; 3) аргиллит; 4) концентрация в песчаниках; 5) концентрация в алевролитах; 6) концентрация в аргиллитах; 7) шкалы глубин и значений; 8) продуктивный пласт; 9) материнские отложения; ароматические углеводороды и их изомеры: 10) пара-ксилол; 11) метанафталин; 12) орто-ксилол; 13) нафталин; 14) метилнафталин; 15) этилнафталин; 16) диметилнафталин; 17) фенантрен; 18) метилфенантрен; 19) молекулярно-массовое распределение

мигрирующие из тюменских аргиллитов углеводороды можно проследить вверх по юрскому разрезу, по унаследованным значениям CPI н-алканов (1,35...1,39), на расстояние 100 м, до абалакских глин, где они разбавляются нисходящими углеводородами из тутлеймских аргиллитов, имеющих значения индекса CPI 0,91...1,19. Встречающиеся в низах абалакской свиты два потока веществ приобретают усредненное значение индекса CPI на уровне 1,23...1,26.

Ниже – в доюрские отложения, углеводороды также проникают (рис. 4, Б). Из нижнеюрских алевролитов в доюрские слои фиксируется нисходящая миграция легких н-алкилбензолов состава C_{11} – C_{22} , н-алканов состава C_{11} – C_{25} , которые насыщают не только песчаники, но и плотные слои аргиллита. Перемещение прослеживается на расстояние до 250...270 м от тюменских отложений. Прослой аргиллита, расположенный на этом расстоянии, насыщен легкой нефтеподобной органикой, концентрация которой достигает 3015 мг/кг. Ниже по разрезу, в туфопесчаниках, концентрация органического вещества резко падает до 16 мг/кг, причем в органическом веществе фиксируются н-алканы и н-алкилбензолы специфичного (усеченного, не похожего на нефтяной) состава C_{13} – C_{23} , CPI индекс н-алканов составляет 1,57, а экстрагируемые нафталины и фенантроны вообще не обнаружены.

Наиболее вероятная форма нисходящего перемещения веществ в доюрские отложения – диффузия в виде свободной парогазовой фазы с опережающим перемещением легких УВ C_{9-22} на расстояние до 300 м. Фиксируется перемещение вниз и ряда тяжелых УВ, но отслеживается на расстояние до 150 м.

Результатом послойного изучения ММР нефтяных УВ явилось составление схематичной геохимической модели меж- и внутрипластовой вертикальной миграции. На рис. 5 приведен фрагмент геохимической модели для среднеюрских и доюрских отложений, имеющей следующие особенности.

Зона юрского нефтепроявления сформирована в результате активных межпластовых перетоков из низов тюменской свиты и из баженовской (тутлеймской) свиты. Миграция из низов тюменской свиты происходит как в нижележащие доюрские отложения, так и в вышележащие пласты, заполняя углеводородами юрский комплекс до абалакской свиты. Идентифицируемые УВ богаты легкими гомологами C_9 – C_{21} алкилбензолов, нафталинами C_{10} – C_{12} . Расстояние нисходящей миграции нефти составляет 150...300 м в доюрские слои (далее фиксируются фоновые концентрации сингенетичного битумоида). Расстояние, проходимое восходящими потоками до абалакской свиты, составляет около 100 м. Выше абалакского флюидоупора в юрской зоне нефтепроявлений начинает доминировать органика тутлеймской свиты.

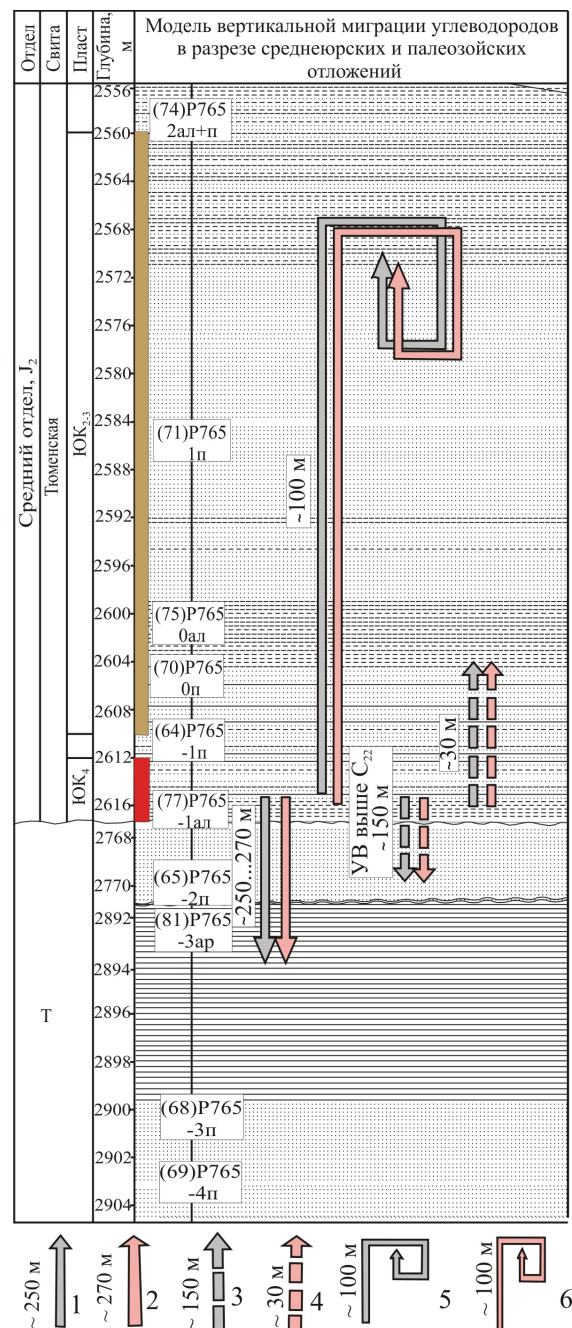


Рис. 5. Геохимическая модель вертикальной миграции углеводородов в разрезе среднеюрских и триасовых отложений Северо-Рогожниковского месторождения (фрагмент из [4]): 1) межпластовая фильтрация насыщенных УВ; 2) межпластовая фильтрация ароматических УВ; 3) межпластовая диффузия насыщенных УВ; 4) межпластовая диффузия ароматических УВ; 5) внутрипластовая миграция насыщенных УВ; 6) внутрипластовая миграция ароматических УВ. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 4

Можно констатировать, что на Рогожниковском ЛУ экспериментально установлена миграция нефтяных УВ из юрских в нижележащие отложения триаса.

Заключение

Результаты геоплотностного моделирования, выполненного по данным гравиразведки и сейсморазведки, позволили выявить на траверсе Рогожниковского ЛУ масштабную зону разуплотнения доюрского комплекса пород, отождествленную с вторичными коллекторами (резервуарами).

Установленная на Рогожниковском ЛУ дальность миграции нефтяных УВ из юрских в нижележащие отложения согласуется с концепцией о юрском генезисе нефтей в резервуарах доюрского основания.

Результаты исследований на полигоне Рогожниковского ЛУ позволяют поддержать следующую стратегию поисков залежей нефти в доюрском основании центральной части Западной Сибири. *Первоочередными участками поисков являются терри-*

тории сосредоточения уже известных богатых залежей в нижних этажах осадочного чехла. Именно на этих территориях необходимо ставить работы по выявлению возможных зон разуплотнения в фундаменте. Если здесь зона разуплотнения выявляется, то это первоочередной объект детализации поисков залежей в фундаменте.

Надежным и недорогим методом выявления зон разуплотнения в фундаменте является геоплотностное моделирование по данным сейсморазведки и гравиразведки.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, по проекту в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы», ГК № 14.515.11.0073.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доюрское основание (ПСЭ) в Западной Сибири – объект новых представлений на природу нефтегазоносности (из опыта исследований и практического освоения Рогожниковского ЛУ) / Т.А. Коровина, Е.П. Кропотова, Н.Н. Минченков, А.Ю. Батурин, Е.В. Николаева // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского автономного округа – Югры: Труды XII научно-практической конференции. – Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2009. – Т. 1. – С. 214–218.
2. Исаев В.И., Лобова Г.А. Корреляция плотностной структуры доюрских отложений и зон нефтегазоаккумуляции вдоль регионального сейсмопрофиля ХП (центральная часть Западно-Сибирской плиты) // Геофизический журнал. – 2008. – Т. 30. – № 1. – С. 3–27.
3. Исаев В.И. Прогноз зон нефтегазоаккумуляции на траверсе Краснотуркменский свод – Ляпинский мегапрогиб (по результатам геоплотностного моделирования) // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 1. – С. 26–33.
4. Жильцова А.А., Исаев В.И., Коржов Ю.В. Вертикальная геохимическая зональность нефтегазоносных комплексов (на примере Рогожниковского и Северо-Рогожниковского месторождений) // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 1. – С. 69–82.
5. Тиссо Б., Вельте Д. Образование и распространение нефти. – М.: Мир, 1981. – 503 с.

Поступила 02.09.2013 г.

UDC 553.98;571.12

GENESIS OF PRE-JURASSIC OIL DEPOSITS OF ROGOZHNIKOV GROUP OF FIELDS BY GRAVITY EXPLORATION AND GEOCHEMISTRY DATA (TYUMEN REGION)

Galina A. Lobova,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: lobovaga@tpu.ru

Yury V. Korzhov,

Cand. Sc., Yugra State University,
Russia, 628012, Khanty-Mansiysk, Chekhov street, 16. E-mail: ykor1962@mail.ru

Lidiya K. Kudryashova,

Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: lidiya3107@yandex.ru

Determination of «the major source» of hydrocarbons of pre-Jurassic oil-and-gas bearing complex defines the genesis of oil accumulations in pre-Jurassic base of Western Siberia and, consequently, the strategy and basis for prospecting technology.

The main aim of the study is to inform specialists about author's results in application of gravity exploration and geochemical testing within the Rogozhnikov license area (the Krasnoleninsk arch), which was recognized as «etalon» to study the problem of «the major source».

The methods used in the study are complex interpretation of data of seismic survey, gravity exploration and drilling on the basis of geodensity modeling, petroleum-geological interpretation of «zones of deconsolidation», the layer-by-layer analysis of core of productive, above and under productive depositions on the content and molecular-mass distribution of oil hydrocarbons by the methods of organic geochemistry.

As a result of studies on a traverse of the Rogozhnikov license area the authors have revealed the zone of deconsolidation of pre-Jurassic complex of formations, identified with the secondary reservoirs. The upright migration of oil hydrocarbons from Jurassic generation zones into pre-Jurassic deconsolidated formations was determined. The Jurassic concept of «the major source» is confirmed. The territories of focusing of already known reservoirs in ground floors of a sedimentary cover are determined as prior areas for prospecting. The geodensity modeling is recommended as a reliable and inexpensive method for detecting zones of deconsolidation in the foundation.

Key words:

Pre-Jurassic basis, geodensity modeling, secondary reservoirs, geochemical researches of a core, vertical migration, oil genesis, Krasnoleninsk arch.

REFERENCES

1. Korovina T.A., Kropotova E.P., Minchenkov N.N., Baturin A.Yu., Nikolaeva E.V. Doyurskoe osnovanie (PSE) v Zapadnoy Sibiri – obekt novykh predstavleniy na prirodu neftegazonosnosti (iz opyta issledovaniy i prakticheskogo osvoeniya Rogozhnikovskogo LU) [Pre-Jurassic base (BSF) in Western Siberia is the object of new concepts on the nature of oil and gas bearing (from the experience of research and practical development Rogozhnikov license area)]. *Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry*. Trudy XII nauchno-practicheskoy konferentsii [Proc. 12th scientific conference. Ways of realization the oil, gas and ore potential of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra]. Khanty-Mansiysk, IzdatNaukaServis Publ., 2009, vol. 1, pp. 214–218.
2. Isaev V.I., Lobova G.A. Korrelyatsiya plotnostnoy struktury doyrskikh otlozheniy i zon neftegazonakopleniya vdol regionalnogo seysmoprofilia XIII (tsentralnaya chast Zapadno-Sibirskoy plity) [Correlation density structure of pre-Jurassic sediments and oil and gas accumulation zones along regional seismic profile XIII (the central part of the West Siberian Plate)]. *Geofizicheskiy zhurnal*, 2008, vol. 30, no. 1, pp. 3–27.
3. Isaev V.I. Prognoz zon neftegazonakopleniya na traverse Krasnoleninskiy svod – Lyapinskiy megaprogib (po rezultatam geoplotnostnogo modelirovaniya) [Forecast of oil and gas accumulation zones on the traverse Krasnoleninskiy arch – Lyapinskaya megasag (results of geodensity modeling)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 1, pp. 26–33.
4. Zhiltsova A.A., Isaev V.I., Korzhov Yu.V. Vertikalnaya geokhimicheskaya zonalnost neftegazonosnykh kompleksov (na primere Rogozhnikovskogo i Severo-Rogozhnikovskogo mestorozhdeniy) [Vertical geochemical zoning of oil and gas complexes (by the example of Rogozhnikovsky and Severo-Rogozhnikovsky fields)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 1, pp. 69–82.
5. Tisso B., Velte D. *Obrazovanie i rasprostranenie nefti* [Formation and distribution of oil]. Moscow, Mir Publ., 1981. 503 p.

УДК 553.411.071:550.4

КАРТИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧЕРТОВО КОРЫТО (ПАТОМСКОЕ НАГОРЬЕ)

Гаврилов Роман Юрьевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных
ископаемых Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: GavrilovRY@ignd.tpu.ru

Проведена обработка геохимических данных по вторичным ореолам рассеяния мезотермального золоторудного месторождения Чертово Корыто с целью определения местоположения уровней оруденения на дневной поверхности. Основу исследования составили данные анализов сколковых проб, отобранных из поверхностных горных выработок и керна вертикальных разведочных скважин. Полученные аналитические данные обработаны с помощью дискриминантного анализа, основанного на «распознавании образов». Установлено, что геохимические спектры над-, средне- и подрудного уровней золотого оруденения имеют существенные различия. В результате разделения массива геохимических проб на основе отнесения их к эталонным выборкам, проведено выделение трех уровней оруденения на площади месторождения. Показана принципиальная возможность применения дискриминантного анализа для картирования уровней золотого оруденения.

Ключевые слова:

Золото, вторичные ореолы рассеяния, эрозионный срез, уровни оруденения, эталонные выборки, дискриминантный анализ, картирование.

Постановка задачи

Определение эрозионного среза рудных месторождений, геохимических характеристик уровней оруденения имеет существенное значение как для теории рудообразования, так и для практики проведения геологоразведочных работ (ГРР).

Наиболее детально теория эндогенной осевой, поперечной и продольной геохимической зональности первичных ореолов изучена в работах [1, 2]. В результате многолетних исследований нескольких сотен сульфидсодержащих гидротермальных рудных месторождений различного генезиса, располагающихся в различных тектонических обстановках, был составлен обобщенный ряд осевой (вертикальной) геохимической зональности. Определение геохимических ассоциаций элементов, участвующих в процессе рудообразования, позволяет посредством геохимического картирования наряду с минералогическими исследованиями установить очередность процесса отложения рудоносных гидротермальных растворов и выделить области, соответствующие тому или иному гипсометрическому уровню оруденения.

Практика проведения прогнозно-поисковых работ показывает, что своевременное установление уровня эрозионного среза оруденения позволяет избежать существенных материальных и трудовых затрат на изучение объектов, в существенной степени уничтоженных процессами денудации. Кроме этого, выделение ассоциаций химических элементов, характерных определенному уровню оруденения на эталонных объектах, позволяет на площадях, благоприятных для выявления объектов аналогичного генезиса, определять степень их эродированности, местоположение на изучаемой площади и в объеме недр и, следовательно, определять степень их перспективности.

Методика определения ряда вертикальной геохимической зональности элементов-индикаторов, предложенная в [2], несмотря на ее активное использование в практике ГРР [3], не всегда позволяет получать однозначно трактуемые результаты. В связи с этим назрел вопрос о разработке новых методов и подходов в определении положения уровней рудных тел. Из множества существующих методов наиболее удачным нам представляется использование методов математической статистики, выделяющих группы проб по схожести поведения ассоциаций химических элементов, с использованием всего геохимического спектра проанализированных элементов. Одним из методов, зарекомендовавших себя в практике проведения ГРР, является дискриминантный анализ [4].

На примере золоторудного месторождения черносланцевой формации Чертово Корыто, показана возможность использования дискриминантного анализа для картирования уровней оруденения, выходящих на дневную поверхность, по результатам опробования вторичных ореолов рассеяния.

Методика исследования

Месторождение Чертово Корыто изучено с помощью поверхностных горных выработок и разведочных скважин. Подсчитаны запасы категорий C_1+C_2 , позволяющие отнести его к крупным месторождениям золота. В основу работы положены результаты анализов секционного сколкового опробования траншей и близповерхностных проб из керна скважин с определением содержания элементов-спутников золотого оруденения. Длина групповых секционных сколковых проб, отобранных из траншей, варьировала от 2 до 8 метров. Протяженность траншей достигала 400 и более метров, что позволяло пересекать рудную залежь и выходить за ее пределы. В статистические расчеты

включены результаты анализов сколовых проб, отобранных из измененного (процессами выветривания) керна разведочных скважин до глубины 6 метров от поверхности.

Эмиссионным спектральным полуколичественным методом в лаборатории Бодайбинской экспедиции по групповым секционным пробам, составленным из сколовых проб, проведен анализ содержания стандартного набора элементов ($n=28$). Во всех секционных пробах определены барий, бериллий, цирконий, марганец, титан, ванадий, хром, никель, кобальт, свинец, медь, цинк, олово, молибден, литий, ниобий, стронций, серебро, мышьяк, иттрий, вольфрам, фосфор, бор. Лантан, сурьма, висмут, иттербий, таллий характеризуются содержаниями ниже чувствительности анализа.

При создании эталонных выборок по трем уровням оруденения были использованы пробы (не менее 30 для каждого уровня) из четырех траншей, расположенных в различных частях месторождения. Для определения положения уровней оруденения на дневной поверхности использованы анализы более 1700 секционных сколовых проб. Золото не включалось в спектр элементов, участвующих в процедуре проведения дискриминантного анализа в связи со значительной нагрузкой, оказываемой на канонические переменные.

Методика проведения дискриминантного анализа подробно описана в [5]. Применение этого метода с целью оценки уровня эрозионного среза обусловлено тем, что он основан на «распознавании образов», которые используются для отнесения

(«дискриминирования») переменных к тем или иным наборам данных («группам»). При дополнении эталонной выборки новыми пробами с неизвестными характеристиками они относятся к одной из выделенных групп с вероятностью от 0 до 100 %.

Краткий очерк геологического строения месторождения

Геологическая позиция и строение месторождения описаны в работах [6].

Месторождение располагается на севере Иркутской области в северной части Патомского нагорья (рис. 1). Оно является типичным представителем мезотермального золотого оруденения в черных сланцах. Рудная залежь локализована в синклинальной брахискладке, образованной толщей раннепротерозойских углеродистых пород михайловской свиты (рис. 2). Углы падения пород варьируют от субгоризонтальных до пологих ($10...20^\circ$) с изменением направления падения от южного на северном фланге до северо-северо-западного на южном. Складка осложнена флексурами более высоких порядков. Толща сложена метаморфизованными до эпидот-амфиболитовой фации аркозовыми разнозернистыми, мелкозернистыми песчаниками, алевролитами, аргиллитами. Все породы обогащены углеродом от долей до 2 об. %. Пачка терригенно-осадочных пород подверглась метасоматическим изменениям пропилит-березитового профиля с образованием многочисленных золото-сульфидно-карбонат-кварцевых жил и прожилков.



Рис. 1. Схема расположения месторождения Чертово Корыто

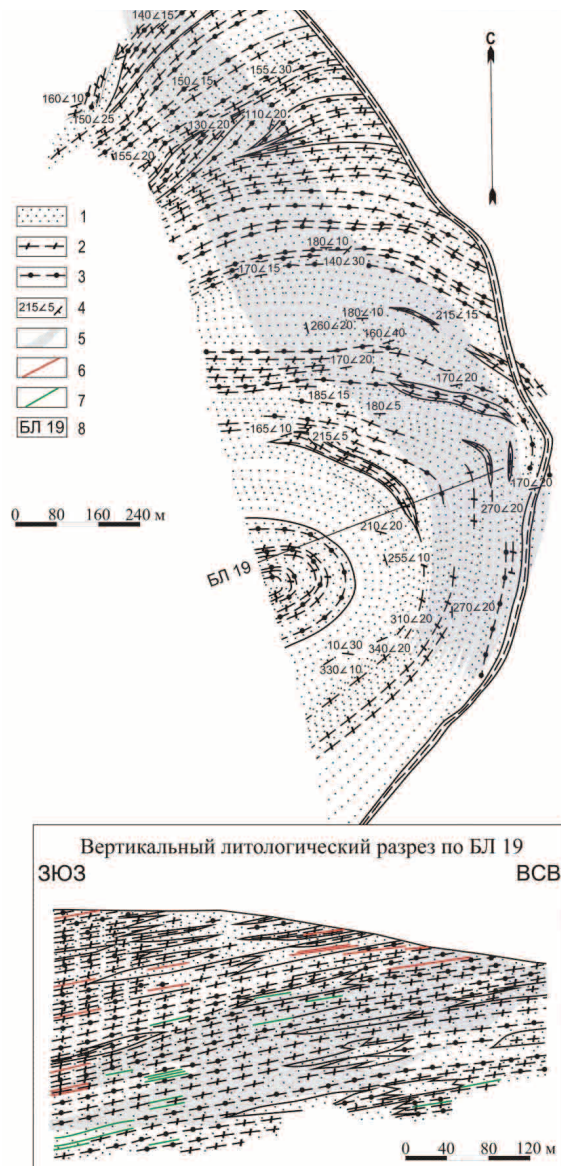


Рис. 2. Схема геологического строения месторождения Чертово Кoryто: 1) как правило, плохо отсортированные серые до темно-серых, от тонко- до среднезернистых, неяснослойчатые грубослойчатые полевошпат-кварцевые песчаники, алевро-песчаники, углеродистые и безуглеродистые; 2) как правило, плохо отсортированные темно-серые разномасштабные, от мелко- до крупнозернистых тонкослойчатые до грубослойчатых полевошпат-кварцевые алевриты, песчаные алевриты, углеродистые и безуглеродистые; 3) аргиллиты серицитовые с незначительным (до 25 об. %) содержанием или отсутствием обломочной фракции песчаной и/или алевритовой размерности, углеродистые и безуглеродистые; 4) азимут и угол падения слоев; 5) область сульфидной минерализации; 6) зоны тонкого расщепления и дробления пород; 7) тыловые зоны (хлоритовая, альбитовая, березитовая) рудовмещающего метасоматического ореола

Рудная залежь контролируется глубинным разломом север-северо-западного простирания, падающим в запад-юго-западном направлении под углом около 60° . Она образована в висячем боку

разлома, оконтурена по бортовому содержанию $0,5$ г/т, полого (до 20°) погружается в западном направлении при протяженности $1,8$ км и ширине до 500 м. Ее мощность достигает 140 м. Содержание золота в рудном теле колеблется от сотых долей до сотен г/т. Проба золота варьирует в пределах от 744 до 971 ‰. В зависимости от принятого варианта кондиций размеры рудной залежи и количество запасов существенно изменяются. В центральной части наблюдается максимальная мощность рудного тела с наиболее богатыми рудными интервалами. По периферии залежь представлена отдельными маломощными выклинивающимися рудными линзами с более низкими содержаниями металла. Сравнение детально изученных литологических разрезов по 4 разведочным профилям с данными о распределении золота не выявило литологического контроля оруденения.

Аномальная структура геохимического поля

Ранее в работе [7] были детально изучены геохимические особенности распределения вторичных ореолов рассеяния золота и его элементов-спутников – серебра, мышьяка, свинца, цинка, меди, никеля, кобальта.

Вторичный ореол золота в пределах рудной залежи отличается высококонтрастными аномалиями (рис. 3), превышающими фоновые значения в 100 – 1000 и более раз.

Содержание золота во вторичном ореоле изменяется от $0,05$ до $n \times 10$ г/т. Его распределение на дневной поверхности, как и в объеме месторождения, крайне неравномерно. Наибольшие значения отмечаются внутри контура выхода рудного тела на дневную поверхность – среднерудный уровень оруденения. Ореолы с концентрацией золота выше 1 г/т также локализованы в северной части месторождения. Наименьшей концентрацией элемента характеризуется западная часть минерализованной зоны, соответствующая надрудному уровню оруденения. В восточной части, отвечающей подрудному уровню, содержание золота варьирует от следов до значений <1 г/т. Таким образом, по результатам аналитических определений содержания золота во вторичных ореолах частично можно выделить среднерудный уровень оруденения. Очевидно, что для уверенного выделения всех уровней оруденения, выходящих на дневную поверхность, не достаточно рассматривать распределение содержания основного рудного элемента – золота, а необходимо использовать полный спектр проанализированных элементов.

Строение аномального геохимического поля расфигуровано с применением комплекса методов математической статистики. Основной вклад в создание аномальной структуры геохимического поля месторождения Чертово Кoryто вносят высококонтрастные ореолы рудогенных элементов: золота, серебра, мышьяка и свинца. Установлено концентрически зональное строение геохимического ореола месторождения. Это обстоятельство затруд-

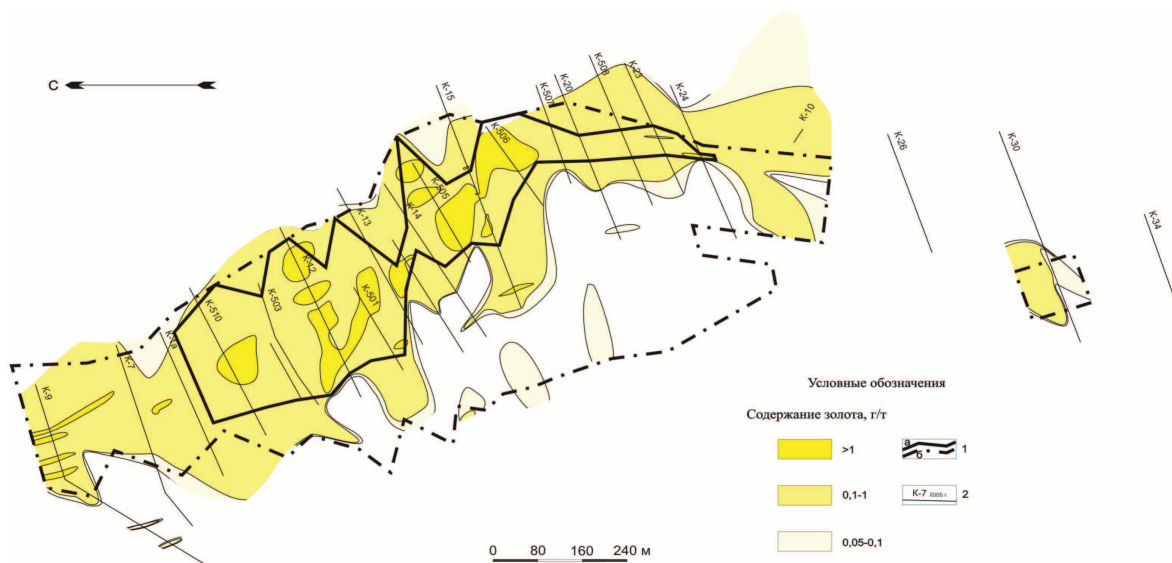


Рис. 3. Распределение содержания золота на дневной поверхности месторождения. Здесь и на рис. 5: 1) контур промышленной рудной залежи на дневной поверхности (а) и контур не выходящих на дневную поверхность флангов промышленной рудной залежи в проекции на горизонтальную плоскость (б); 2) траншеи и их номера

няет оценку уровня эрозионного среза традиционными методами (ряды геохимической зональности, ранжирование и др.).

Результаты исследования

Для определения пространственного положения уровней оруденения на дневной поверхности методом дискриминантного анализа было создано три выборки (около 30 проб в каждой), характеризующие над-, средне- и подрудный уровни. В отличие от предыдущих исследований [8], использование только основных рудогенных элементов (Ag, As, Pb, Zn, Cu, Co, Ni) при проведении дискриминантного анализа не позволило разделить пробы на классы, соответствующие уровням оруденения, поэтому в статистических расчетах участвовали все 23 химических элемента, определенных эмиссионным спектральным полуквантитативным анализом.

В результате проведения дискриминантного анализа три уровня оруденения заняли свои области в осях многомерных канонических переменных (рис. 4).

Очевидно, что состав геохимических ассоциаций, участвующих в формировании той или иной группы проб во вторичных ореолах рассеяния, зависит как от минерального состава первичных ореолов рассеяния, так и от характера поведения элементов в зоне гипергенеза. Несмотря на использование всех химических элементов в статистических расчетах, интерпретация поведения Cr, Nb, Sr, W, Y представляется затруднительной из-за незначительных вариаций их содержания, обусловленной их слабой подвижностью в пределах гидротермального метасоматического ореола и/или точностью выполненного анализа.

Подрудный уровень золотого оруденения отличается более низкими значениями содержания ассоциации элементов, характерных для среднерудного уровня, – Co, Zn, As, P, и характерных для надрудного, – Mn, Ti, V, Ni, Cu, Zn. В первом случае это, вероятно, связано с менее интенсивными процессами гидротермальной переработки терригенно-осадочных пород, а во втором – с процессами выноса петрогенных и рассеянных элементов на периферию минерализованной зоны. В то же время на нижнем уровне также отмечаются повышенные содержания Sn, В, обусловленные высокой концентрацией касситерита и турмалина в нижней части гидротермально-метасоматической колонны, что характерно для большинства мезотермальных золоторудных месторождений. Для надрудного уровня золотого оруденения, как и для подрудного, характерно повышенное содержание петрогенных Mn, Ti, и рассеянных V, Ni, Cu, Zn элементов, что свидетельствует о центробежном характере их распределения в крупнообъемном метасоматическом ореоле. Среднерудный уровень отличается ассоциацией элементов Co, Zn, As, P, что, прежде всего, связано с процессами гидротермального минералообразования и интенсивным привнесом данных элементов в ядерную часть месторождения.

Схема распределения уровней оруденения на месторождении по результатам дискриминантного анализа приведена на рис. 5. На дневной поверхности *надрудный* уровень картируется ореолом (группой проб), расположенным за пределами контура выхода рудного тела. Отсутствие ореола в западной части месторождения на ряде буровых линий обусловлено недостатком геохимических проб в данной области. Группа проб, характеризующая *среднерудный* уровень оруденения, образует ореол,

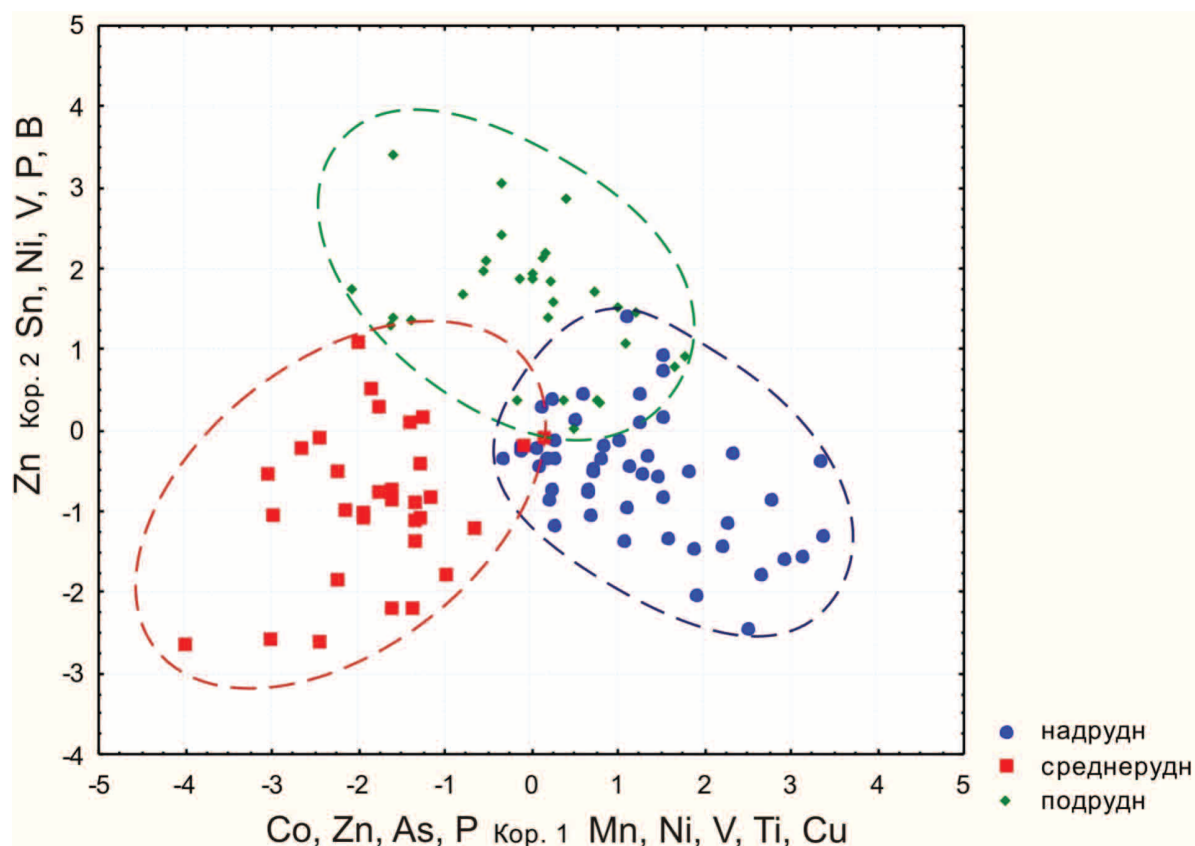


Рис. 4. Группировка секционных сколовых геохимических проб по результатам дискриминантного анализа

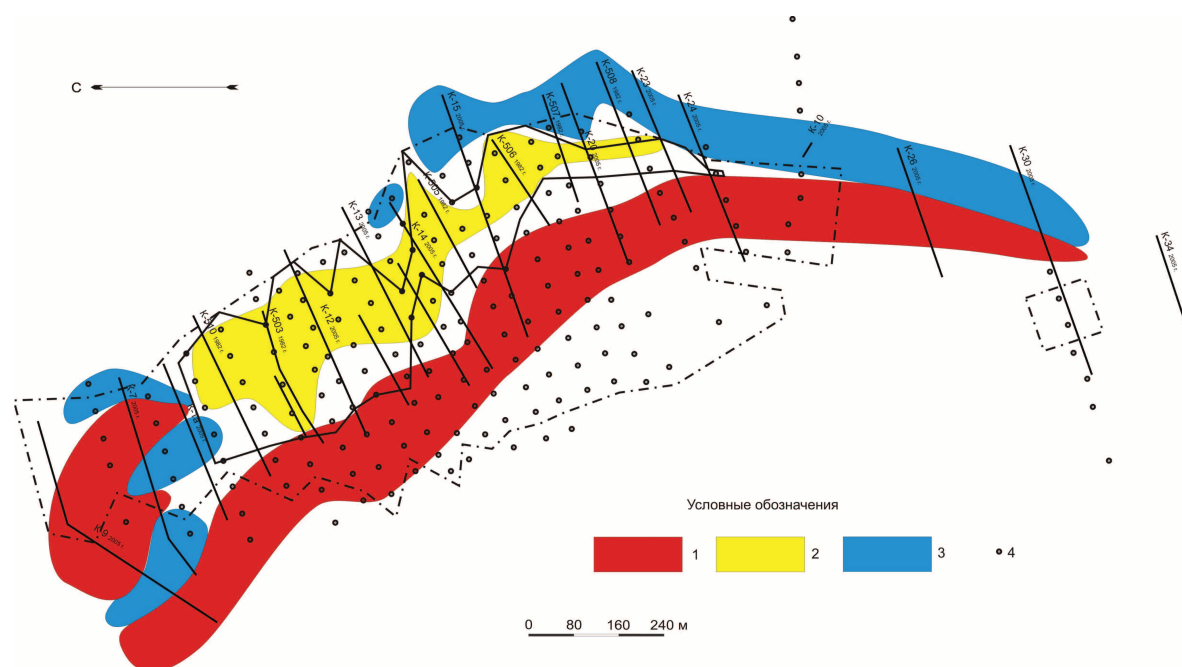


Рис. 5. Схема распределения уровней оруденения на дневной поверхности по результатам дискриминантного анализа. Уровни оруденения: 1 – надрудный, 2 – среднерудный, 3 – подрудный; 4 – разведочная скважина

пространственно совмещенный с выходом рудного тела на дневную поверхность. Подрудный уровень оруденения картируется лишь частично в связи с

ограниченным количеством горных выработок и скважин в восточной части месторождения, выходящих за пределы нулевого контура.

Таким образом, на дневной поверхности месторождения по выделенным группам проб картируются над-, среднерудный уровни оруденения и, частично, подрудный. Анализируя полученные результаты, можно констатировать, что методика выделения уровней оруденения по вторичным ореолам рассеяния может успешно применяться на площадях, перспективных для выявления и оконтуривания рудных объектов, выходящих на дневную поверхность.

Выводы

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. По результатам дискриминантного анализа эталонные геохимические выборки по вторичным ореолам рассеяния, характеризующие над-, средне- и подрудный уровни золотого оруденения, четко выделились в осях многомерных канонических переменных.
2. Геохимические характеристики уровней оруденения существенно различны. Для надрудного

уровня золотого оруденения характерно повышенное содержание Mn, Ti, V, Ni, Cu, Zn. Среднерудный уровень характеризуется ассоциацией элементов Co, Zn, As, P. Подрудный уровень отличается повышенными значениями содержания более широкого комплекса элементов: Co, Zn, As, P, Mn, Ti, V, Ni, Cu, Zn, Sn, B.

3. Разделение массива геохимических проб, отобранных по вторичным ореолам рассеяния на основе отнесения их к эталонным выборкам (группам проб), позволило успешно выделить на площади месторождения три уровня оруденения.
4. На примере золоторудного месторождения Чертово Корято показана возможность применения дискриминантного анализа с целью картирования уровней оруденения на дневной поверхности. Картирование может проводиться как по вторичным ореолам рассеяния при проведении площадных поисково-оценочных работ, так и по первичным ореолам рассеяния – в объеме, занимаемом рудными телами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беус А.А., Григорян С.А. Геохимические методы поисков и разведки месторождений твердых полезных ископаемых. – М.: Недра, 1975. – 280 с.
2. Григорян С.А. Первичные геохимические ореолы при поисках и разведке рудных месторождений. – М.: Недра, 1987. – 407 с.
3. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. – М.: Недра, 1983. – 191 с.
4. Ворошилов В.Г. К вопросу о геометризации аномальных структур геохимических полей гидротермальных рудных месторождений // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 84–89.
5. Шестаков Ю.Г. Математические методы в геологии. – Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1988. – 208 с.
6. Петролого-геохимические черты рудовмещающего метасоматического ореола золоторудного месторождения Чертово Ко-

рыто (Патомское нагорье) / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верховин // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 1. – С. 11–20.

7. Объемная геолого-геохимическая модель мезотермального золоторудного месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) / Р.Ю. Гаврилов, И.В. Кучеренко, В.Г. Мартыненко, А.В. Верховин // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 30–43.
8. Структура геохимического поля мезотермального золоторудного месторождения Чертово Корято (Северное Забайкалье) / Р.Ю. Гаврилов, И.В. Кучеренко, В.Г. Мартыненко, А.В. Верховин // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 11. – С. 19–24.

Поступила 20.09.2013 г.

MAPPING OF VERTICAL GEOCHEMICAL ZONATION BY THE EXAMPLE OF GOLD FIELD CHERTOVO KORYTO (THE PATOM UPLAND)

Roman Yu. Gavrillov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: GavrillovRY@ignd.tpu.ru

In order to determine the location of mineralization levels on the surface the geochemical data processing has been carried out on the secondary dispersion halos of mesothermal gold field Chertovo Koryto. Rock samples from surface mine openings and core of vertical exploration wells were in the base of investigation. The obtained analytical data were processed by means of the discriminant analysis based on «recognition of images». It was established that geochemical ranges of above-, middle- and below ore levels of a gold field have essential distinctions. As a result of division of the massif of geochemical samples on the basis of their classification as reference samples, three levels of mineralization were determined on the deposit area. The paper introduces the principal possibility of applying discriminant analysis for mapping gold mineralization levels.

Key words:

Gold, secondary dispersion halos, erosional truncation, mineralization levels, reference samples, discriminant analysis, mapping.

REFERENCES

1. Beus A.A., Grigoryan S.A. *Geokhimicheskie metody poiskov i razvedki mestorozhdeniy tverdykh poleznykh iskopaemykh* [Geochemical exploration methods for mineral deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 280 p.
2. Grigoryan S.A. *Pervichnye geokhimicheskie oreoly pri poiskakh i razvedke rudnykh mestorozhdeniy* [Primary geochemical haloes in ore deposit exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 407 p.
3. *Instruktsiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [Instructions for geochemical methods of ore deposit exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 191 p.
4. Voroshilov V.G. K voprosu o geometrizatsii anomalnykh struktur geokhimicheskikh poley gidrotermalnykh rudnykh mestorozhdeniy [Geometrization of anomaly structures of hydrothermal ore deposit fields]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 84–89.
5. Shestakov Yu.G. *Matematicheskie metody v geologii* [Mathematical methods in geology]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk University Press, 1988. 208 p.
6. Kucherenko I.V., Gavrillov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhovzin A.V. Petrologo-geokhimicheskie cherty rudovmeshchayushchego metasomaticheskogo oreola zolotorudnogo mestorozhdeniya Chertovo Koryto (Patomskoe nagore) [Petro-geochemical characteristics of ore-hosting mesotomitic halo in Chertovo Koryto gold-ore deposit (The Patom upland)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 1, pp. 11–20.
7. Gavrillov R.Yu., Kucherenko I.V., Martynenko V.G., Verkhovzin A.V. Obemnaya geologo-geokhimicheskaya model mezotermalnogo zolotorudnogo mestorozhdeniya Chertovo Koryto (Patomskoe nagore) [3D geologic-geochemical model of mesothermal Chertovo Koryto gold-ore deposit (The Patom upland)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 1, pp. 30–43.
8. Gavrillov R.Yu., Kucherenko I.V., Martynenko V.G., Verkhovzin A.V. Struktura geokhimicheskogo polya mezotermalnogo zolotorudnogo mestorozhdeniya Chertovo Koryto (Severnoe Zabaykale) [Geochemical field structure of mesothermal Chertovo Koryto gold-ore deposit (North Transbaikalia)]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2010, no. 11, pp. 19–24.

УДК 550.83:550.814:553.41

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ЗОЛОТОРУДНЫХ ПОЛЯХ СИБИРИ

Ерофеев Леонид Яковлевич,

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

E-mail: Erofeev_Leonid@tpu.ru

Орехов Александр Николаевич,

канд. геол.-минер. наук, доцент кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

E-mail: orekhovan@mail.tomsknet.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности геолого-поисковых работ при изучении месторождений золота.

Цель работы: *определение возможностей комплекса геофизических методов при поисках, разведке и эксплуатации золоторудных полей Сибири.*

Методы исследования: *сбор, анализ и обобщение результатов ранее выполненных геофизических исследований на месторождениях золота Сибири, касающихся, главным образом, проблем их типизации. Анализ основных физико-геологических обстановок на месторождениях золота Сибири. Использовались как литературные данные, так и материалы собственных полевых геофизических работ, проведённых в Восточном и Западном Саянах, Кузнецком Алатау, Енисейском Кряже, Байкальской горной области, а также Забайкальской части Монголо-Охотского рудного пояса.*

Результаты: *предложена геофизическая типизация золоторудных объектов Сибири, созданная на основе определения особенностей их проявления в физических полях на фоне вмещающих пород. Для каждого из выделенных типов определены основные возмущающие факторы. Оценена эффективность геофизических методов при изучении золоторудных объектов для каждой из охарактеризованных обстановок.*

Ключевые слова:

Систематизация рудных полей, месторождения золота, геофизические методы поисков и разведки, магниторазведка, электро-разведка, гаммаспектрометрия.

Месторождения золота Сибири весьма многообразны. Известно, что формировались они во все времена, отмеченные в геологической науке, и на всех изученных стадиях преобразования Земной коры. Если иметь в виду только промышленно значимые скопления благородного металла, называемые «коренными месторождениями золота», то их появление обусловлено деятельностью геологических процессов, протекавших в Земной коре в периодах от докембрия до позднего палеозоя.

Золото встречается практически во всех геолого-геохимических группах рудных месторождений и во всех типах геотектонических структур. Но для отложения его в повышенных концентрациях на ограниченных участках необходимо, чтобы в пределах этих участков прошло множество разнообразных процессов, которые мобилизуют, переносят и осаждают золото в благоприятной геологической обстановке из рассеянного (фоновое) состояния в месторождения.

Опыт изучения золоторудных месторождений показывает, что, с одной стороны, они имеют различные рудоконтролирующие геологические формации, а также пликативные, дизъюнктивные и другие особенности геологического строения, поэтому каждое месторождение золота, с учётом всей совокупности элементов, характеризующих его, представляется образованием феноменальным. С другой стороны, в ряду многообразия обстановок нахождения и природы формирования золотого

оруденения имеются схожие по ряду признаков месторождения, что позволяет объединять их в относительно однородные группы (типы). Типизация проводится на основе данных о результатах деятельности в геологической среде комплекса рудообразующих процессов.

Значительный интерес к вопросам типизации, пик исследований по которым пришёлся на 90-е гг. прошлого столетия, вызван необходимостью обобщения и анализа огромного фактического материала, накопленного практически во всех золоторудных провинциях страны, с основной целью – повышение эффективности геологоразведочных работ на золото.

Особо весомый вклад в создание и развитие этого научно-методического направления внесли сотрудники ЦНИГРИ и ряда других организаций (И.Б. Бородаевская, Н.И. Бородаевский, Д.И. Горжевский, Т.Я. Корнев, М.М. Константинов, А.А. Кременецкий, А.И. Кривцов, Н.К. Курбанов, В.К. Нарсеев, Е.М. Некрасов, Ю.И. Новиков, Ю.И. Новожилов, В.Ю. Прокофьев, Ю.Г. Сафонов, А.М. Спиридонов, Н.А. Фогельман и др.).

К настоящему времени, в разной мере детальности и степени соответствия реальной геологической обстановке, определена и принята большей частью исследователей схема типизации золоторудных месторождений, созданная на основе золоторудных формаций с учётом геологических обстановок нахождения месторождений [1]. Она играет

существенную роль в исследовательских и производственных работах на золото, представляя в концентрированной форме более чем вековой опыт поиска, разведки и эксплуатации месторождений золота, но она далеко не в полной мере отвечает запросам разведочной геофизики. Это обусловлено главным образом тем, что, *во-первых*, значимые с геологических позиций признаки месторождений и обстановок их нахождения не обязательно будут проявляться в физических полях в той же мере, а могут и вообще никак не проявляться, а *во-вторых*, интегральным отображением элементного состава рудных тел в наблюдаемых физических полях. Поэтому найти практически приемлемое соответствие между геолого-геохимическими и геолого-геофизическими типами месторождений в общем виде не представляется возможным.

Анализ опубликованных и фондовых геологических, геофизических материалов, результатов многолетних петрофизических и комплексных геофизических исследований, выполненных нами на золоторудных полях в пределах складчатого обрамления Сибирской литосферной плиты (зеленокаменные пояса Восточного и Западного Саян, Енисейского кряжа, Байкальской горной области, Забайкальской части Монголо-Охотского пояса) показали, что наиболее приемлемым критерием разделения и систематизации золоторудных месторождений этого региона с физико-геологических позиций являются породы, вмещающие рудные поля.

По «вмещающей среде» рудные поля золота региона делятся на следующие типы, локализованные в: 1) интрузивных образованиях, 2) углеродисто-терригенных (черносланцевых) толщах, 3) приконтактных (скарновых) зонах терригенно-вулканогенно-карбонатных комплексов пород с интрузивными и 4) терригенно-осадочных флишеидных толщах пород.

Золоторудные поля, локализованные в интрузивных образованиях

К первому геолого-геофизическому типу относятся многие месторождения золота Сибири, рудные поля которых целиком локализованы в интрузивных комплексах пород (Центральное, Комсомольское, Берикульское, Дарасунское, Теремкинское, Талатуйское, Кирийское, Пильнинское, Козловское, Дильмачикское, Апрельковское, Ара-Илинское, Итакинское, Дыбинское, Ключевское и др.) [2–5].

В пределах этих золоторудных полей основными аномалеобразующими геологическими неоднородностями, значимыми для поисково-разведочных работ, являются (первый геолого-геофизический тип):

- контакты интрузивных массивов, вмещающих рудное поле, с породами «рамы»;
- неоднородности минералогического состава вмещающих оруденение пород;

- рудные тела и локальные околорудно измененные участки пород.

Все отмеченные аномалеобразующие геологические неоднородности в той или иной мере имеют отношение к золотооруденению, но особенно тесно связаны с ним локальные метасоматиты, наличие которых в пределах рудных полей позволяет прогнозировать с помощью геофизических методов местоположение рудных тел, их морфологию и, при наличии эталонов, их продуктивность.

Самородное золото, обладающее многими уникальными физическими свойствами, в наблюдаемых при геофизических съемках полях не создает заметного отражения главным образом из-за малого объема его нахождения в общей массе руды. Известно, что основная часть его (в рудном теле) заключена в трех минералах – кварце, пирите и арсениопирите, реже – в магнитном пирротине. Благодаря присутствию сульфидов, рудные тела практически всех месторождений золота имеют повышенную электропроводность, поляризуемость, плотность и по большей части немагнитны. Поэтому аномальный эффект в физическом поле существенно зависит от содержания сульфидов в рудном теле. В большинстве формационных типов выделяют малосульфидные (1...5 % от общего объема руды), умеренно-сульфидные (5...15 %) и существенно-сульфидные (>15 %) подтипы. В геофизическом плане эта градация, без учета размера рудных тел, не может быть использована для оценки возможностей геофизических методов при картировании рудных тел: малообъемные существенно-сульфидные рудные тела могут не находить отражения в наблюдаемых физических полях и наоборот.

Нередко основным объектом при геофизических исследованиях в пределах рудных полей становятся не собственно рудные тела, а околорудно измененные породы, объемы которых на порядок, иногда и более, превышают размеры рудных тел. Поскольку околорудные метасоматиты по морфологии и интенсивности проработки в них рудоносными гидротермами вмещающих пород имеют связь с геофизическими параметрами рудного тела и его продуктивностью, то это существенно расширяет возможности геофизических методов, увеличивает их эффективность при поисках и изучении золоторудных месторождений.

Следует подчеркнуть, что в большинстве случаев, за исключением тех, когда в руде содержится магнитный пирротин или магнетит, рудные тела этого геолого-геофизического типа в магнитном поле представляются как единое целое с околорудными метасоматитами. Это обусловлено тем, что магнитная восприимчивость интрузивных, как правило, магнитных, вмещающих оруденение пород, резко уменьшается в околорудном пространстве (до немагнитного уровня) под действием практически всех видов гидротермальных преобразований пород: березитизации, пиритизации, серицитизации, карбонатизации, окварцевания и т. п. [6–8].

В результате околорудные метасоматиты вместе с немагнитной рудой создают одну нераздельную аномальную зону пониженной магнитной индукции, как правило, контрастно выделяющуюся на фоне магнитных вмещающих пород [9].

Что касается электрических методов разведки, то ситуация у рассматриваемого геолого-геофизического типа выглядит следующим образом.

В полях омического сопротивления и дизлектрической проницаемости, вызванной и естественной поляризации, индуктивных и пьезо эффектов околорудные метасоматиты практически не отличаются от вмещающих пород. Аномальный эффект обуславливают главным образом два фактора – сульфиды рудного тела и в целом рудовмещающая структура, заполненная чаще всего в разной мере дробленными, каолинизированными и обводненными в близповерхностных условиях породами [10–14].

Радиоактивное поле интрузивных массивов в процессе формирования золоторуднения (как на подготовительном этапе метаморфических и метасоматических преобразованиях пород, так и в рудный этап), естественно, трансформируется. Из элементов триады РАЭ наибольшую вероятность перераспределения имеет К. Его привнос происходит при серицитизации, карбонатизации, аргилитизации, березитизации, биотитизации, т. е. его повышенные концентрации могут быть сформированы в околорудных метасоматитах [15, 16].

Рудные поля золота, локализованные в углеродисто-терригенных (черносланцевых) толщах

В рассматриваемой золоторудной провинции к этому типу относится значительная часть месторождений и рудопоявлений золота, в том числе такие крупные как Олимпиада, Сухой Лог, Чертово Корице, Зун-Холба, Герфед, ряд месторождений Ольховско-Чибийской рудной зоны Восточного Саяна, Муйского, Кодаро-Удоканского, Хэнтэй-Даурского и Приаргунского золоторудных районов Забайкалья.

Месторождения сформированы в стратиграфически обособленных толщах мощных отложений геосинклинальных комплексов протерозоя – нижнего палеозоя [2–5].

Для рудных полей, локализованных в этих толщах, характерным является наличие углефицированных и нередко пиритизированных сланцев, в которых в предрудные, рудные и послерудные этапы геологического развития толщи под действием метаморфических, метасоматических и тектонических процессов произошла существенная дифференциация физических свойств, а именно, образовались участки графитизации, повышенной пиритизации, пирротинизации, изменения направления вектора остаточного намагничивания и радиоактивности. С такими участками генетически и пространственно часто связывается оруденение [17–20].

Из отмеченного выше следует, что основными неоднородностями геологического строения, сопровождаемыми аномалиями физических полей, у второго геолого-геофизического типа рудных полей золота являются:

- собственно пачки углефицированных пород;
- участки графитизации углеродистых пород;
- участки пирротинизации и пиритизации углеродистых пород;
- участки с нарушенным остаточным намагничиванием углеродистых пород;
- участки с нарушенным отношением концентраций естественных радиоактивных элементов;
- рудные тела.

Слои углефицированных пород, как правило, четко выделяются в разрезе методами сопротивлений, естественного электрического поля и вызванной поляризации. В этих аномальных зонах отмечаются места повышенной проводимости и (или) поляризации, обычно приуроченные к «изгибам» аномальных зон или их смещениям, обусловленным поперечными тектоническими нарушениями. С этими участками нередко совпадают локальные аномалии магнитного поля, радиоактивности и изменения направления вектора остаточного намагничивания пород [9, 17, 19].

Рудные тела этого геолого-геофизического типа месторождений золота, представленные обычно минерализованными зонами или залежами, реже жилами, чаще всего локализованы в контактовых частях углеродистых пород с карбонатными (Олимпиада, Зун-Холба, Герфед и др.) или располагаются непосредственно в углеродистых толщах (Саралинское, Огне-Потеряевское и др.), создают интенсивные аномалии в поле сопротивлений и электрической поляризации, иногда в магнитных и радиоактивных полях [19].

Рудные поля золота, локализованные в приконтактных (скарновых) зонах терригенно-карбонатных комплексов пород с интрузивами

Скарновые золоторудные месторождения широко распространены в Сибири, особенно в Саянах (Синюхинское, Мурзинское, Чайское, Натальевское, Федоровское, Майско-Лебединское, Тарданское, Копто, лог № 26, Ульменское, Югалинское, Южное и др.) и в Забайкалье (Юбилейное, Быстринское, Андрюшенское, Желанное, Урюмканское, Луганское, Уронайское и др.).

Ведущими аномалеобразующими в физических полях геологическими образованиями у этого типа являются контакты вмещающих терригенно-карбонатных пород, скарнов, рудных тел и интрузивов. Интрузивные породы обычно имеют более высокую магнитную восприимчивость по отношению к практически немагнитным карбонатным комплексам пород. Естественно, что площади их развития уверенно разделяются в магнитном поле.

Скарновые залежи в «чистом виде», т. е. не вмещающие оруденение, по электрическим свойствам практически не отличаются от приконтактовых мраморизованных известняков и интрузивов. В скарнах нередко содержится в значительных количествах рассеянный магнетит или пирротин, что определяет их повышенную магнитную восприимчивость по отношению к вмещающим породам [6, 21].

На большей части скарновых месторождений региона золоторудная минерализация представлена продуктами многоэтапного рудного процесса, различающимися как по минеральному составу, так и их пространственному и структурному положению. В месторождениях, как правило, выделяется два основных типа оруденения: ранние высокотемпературные рудные образования, пространственно и генетически связанные со скарнами, и золоторудная минерализация, в большей мере обособленная от скарнов и представленная средне-, низкотемпературной ассоциацией в виде жильного золото-сульфидно-кварцевого оруденения. Как правило, эта минерализация развивается по линейным зонам дробления тектонических нарушений различных по составу пород, включая осадочные, магматические и реже скарновые. Раннее высокотемпературное оруденение, представленное телами в форме гнезд, минерализованных зон и зон мелких прожилков, формируется обычно на участках антиклинальных перегибов, сопровождающихся структурами отслоения, и, в меньшей мере, флексурных изгибов известняков [21].

Руды обеих ассоциаций обладают электронной проводимостью и, в зависимости от количества сульфидов в руде и объема рудного тела, создают в поле сопротивлений или (и) электрической поляризации аномальный эффект разной интенсивности. Разделить руды между собой в этом случае можно лишь по форме аномалий – у низкотемпературных рудных тел линейно-вытянутые зоны, у ранних – относительно изомерные возмущения.

Руды в отдельных случаях могут быть разделены и по их магнитной восприимчивости. Такое возможно, когда в высокотемпературной ассоциации присутствует магнетит.

В общем же случае руды той и другой ассоциации без магнетита и пирротина всегда обладают низкой магнитной восприимчивостью, благодаря чему они сопровождаются в магнитном поле аномалиями пониженной индукции, которые фиксируются в интрузивных массивах и, нередко, в скарнах. В связи с наложенным характером того и другого оруденения, рудные тела нередко сопровождаются повышенной радиоактивностью (причем для скарнов как правило ториевой природы). При этом наибольшая радиоактивность отмечается в зонах грейзенизации пород [6, 7, 9, 22].

Ряд этих месторождений имеют значительные запасы золота и длительное время находятся в эксплуатации, многие законсервированы, и их промышленная значимость не оценена [2, 4].

Рудные поля золота, локализованные в терригенно-осадочных флишеидных толщах

К рассматриваемому типу золоторудных полей Сибири относится значительная группа рудопроявлений и месторождений Забайкалья, в том числе крупных, длительное время обрабатываемых, таких как Тасеевское и Любавинское, и Енисейского края (Советское, Ветренское, Эльдорадо, и др.).

С геофизических позиций, этим рудным полям присущи три основные особенности.

Рудные тела, представленные кварцевыми жилами, нередко сконцентрированные в пределах рудных полей в обширные протяженные зоны, за редким исключением, немагнитны, как и околорудные метасоматиты, которые в совокупности с рудой в магнитном отношении практически не отличаются от немагнитных вмещающих пород.

Рудные тела из-за малого содержания в них сульфидов чаще всего не оказывают влияния на электросопротивление рудовмещающей структуры. Вследствие этого она в поле электросопротивлений пород может проявляться так же, как и «пустые» тектонические нарушения.

И, наконец, различные литолого-фациальные образования, слагающие вмещающую оруденение толщу, чаще всего имеют практически одинаковые физические свойства.

Понятно, что возможности геофизических методов в условиях этих рудных полей в значительной мере ограничены. При благоприятных условиях для картирования рудных тел (зон) могут быть применены методы электрической поляризации и магнитометрии.

Говоря в целом о предложенной системе геолого-геофизической типизации месторождений золота Сибири, отметим, что она выполнена без учета плотностных и связанных с ними скоростных характеристик пород, вмещающих золоторудные поля.

Сейсмические методы при разведке рудных полей золота пока не нашли значительного применения и, естественно, сегодня нет достаточного фактического материала по распределению упругих свойств пород в пределах рудных полей.

Гравиразведка чаще используется в золоторудных районах, главным образом для целей общего глубинного геокартирования. С ее помощью обычно определяют местоположение интрузивных массивов, перекрытых терригенно-осадочными отложениями, мощность перекрывающих отложений и трассируют крупные тектонические нарушения, первые из которых имеют генетическую связь с оруденением, некоторые из вторых являются рудоконтролирующими образованиями, но какой-либо устойчивой специфики проявления этих плотностных неоднородностей в поле силы тяжести у рудных полей золота не установлено.

При рассмотрении геологических неоднородностей, создающих аномалии в физических полях, не обращалось также внимание на дайки и тектонические нарушения, поскольку они обычно однообразно проявляются в физических полях различ-

ных месторождений – сопровождаются линейно вытянутыми аномалиями повышенных или пониженных значений параметра поля или повышенного градиента его изменения.

Многие рудные месторождения золота Сибири не могут быть отнесены «целиком» к тому или иному типу предложенной классификации. Нередки случаи, когда рудные тела одного и того же месторождения располагаются в различных комплексах терригенно-осадочных пород и интрузивных образований. Более того, некоторые месторождения по формальным признакам относятся к одному типу, а на самом деле по реальной физико-геологической обстановке принадлежат к другому. К примеру, родные тела Балецкого месторождения целиком локализованы в интрузивных породах, но они немагнитны, магнитная восприимчивость их существенно снижена под воздействием комплекса постмагматических процессов, и поэтому они практически не отличаются от немагнитных терригенных осадочных пород рядом расположенного Тасеевского месторождения, и общая физико-геологическая обстановка на Балеце аналогична Тасеевской [23].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методическое руководство по оценке прогнозных ресурсов алмазов, благородных и цветных металлов. Выпуск «Золото» / Б.И. Беневольский, Е.В. Блинова, А.В. Бражкин, С.С. Вартанян, А.И. Кривцов, Е.Е. Крыгня, В.И. Лобач, М.С. Михайлова, Л.Ф. Мызенкова, В.П. Новиков, А.А. Староженко, И.С. Чанышева / отв. ред. Б.И. Беневольский, С.С. Вартанян. – М.: Изд-во ЦНИГРИ, 2010. – 182 с.
2. Спиридонов А.М., Зорина Л.Д. Геолого-генетические модели золоторудных месторождений Забайкальской части Монголо-Охотского складчатого пояса // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 11. – С. 1158–1168.
3. Рошетаев Н.А. и др. Золото Бурятии. Кн. 1. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СОРАН, 2000. – 463 с.
4. Корнев Т.Я. и др. Металлогения золота зеленокаменных поясов Восточного и Западного Саяна. – Красноярск: КНИИ-ГиМС, 2010. – 227 с.
5. Семинский Ж.В., Филонюк В.А., Корж В.В. и др. Модели рудных районов и месторождений Сибири. – М.: Недра, 1994. – 252 с.
6. Чупров В.В. и др. Геолого-геофизическая классификация рудных объектов при общих и детальных поисках // Советская геология. – 1982. – № 4. – С. 24–28.
7. Соловьев Г.А. Петрофизическая классификация рудных месторождений // Геология и разведка. – 1991. – № 6. – С. 22–29.
8. Рудерман Е.Н. К созданию системы обнаружения золоторудных метасоматитов геофизическими методами // Геология и разведка. – 1990. – № 5. – С. 122–128.
9. Ерофеев Л.Я., Орехов А.Н. Магнито-геологические модели золоторудных тел и возможности магнитометрии при их разведке // Минералогия Северо-Восточной Азии: Матер. II Всеросс. научно-практ. конф. – Улан-Удэ: ИД «Экос», 2011. – С. 46–47.
10. Солодов А.А. Применение электроразведки при поисках золоторудных месторождений Дарасунского типа в Восточном Забайкалье // Тр. ЦНИГРИ. – 1962. – Вып. 51. – С. 42–51.
11. Сейфуллин Р.С., Сидельников Ю.З. и др. Геолого-геофизические модели золоторудных месторождений Забайкалья // Геология и геофизика. – 1978. – № 9. – С. 103–108.

Выводы

Предлагаемая физико-геологическая типизация рудных полей месторождений золота позволяет ориентироваться в определении возможностей геофизических методов в круге геологических задач, которые могут быть решены сегодня с помощью геофизики. Физико-геологическая типизация делает возможным априори, на основе только общих геологических данных, наметить необходимый комплекс геофизических методов, выбрать технологию производства геофизических работ, что обуславливается упорядочением характеристик аномалеобразующих геологических неоднородностей в различных комплексах пород, вмещающих золотооруденение.

Выполненное упорядочение физико-геологических условий не является закрытым, исчерпывающим вариантом. Безусловно, его обоснование с разных сторон открыто для критики. Дальнейшие исследования по физико-геологической типизации необходимы, и они будут продолжаться, с нашей точки зрения, по пути выявления новых связей физических полей с рудными полями золота.

12. Антонов В.В. и др. Геофизические методы при поисках и разведке золоторудных месторождений // Поиски мест. тв. пол. ископ. геол. методами: сб. научн. трудов. – М.: Наука, 1979. – С. 108–119.
13. Ерофеев Л.Я., Орехов А.Н. Физические свойства пород и оруденение золото-кварц-сульфидных месторождений // Золото Сибири и Дальнего Востока: Труды III Всеросс. симпозиума с международным участием. – Улан-Удэ, 21–25 сентября 2004. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СОРАН, 2004. – С. 71–74.
14. Киселев М.И. Рациональный комплекс геофизических методов при поисках и разведке золоторудных месторождений // Разведка и охрана недр. – 1973. – № 8. – С. 31–36.
15. Альштулер М.И. Физико-радиохимическая зональность рудных полей золото-кварцевых месторождений // Методы разв. геол.: сб. науч. трудов. – Л.: НПО «Рудгеофизика», 1982. – С. 13–23.
16. Фельдман А.А. и др. Применение гаммаспектрометрии при поисках золоторудных месторождений близповерхностного типа // Разведка и охрана недр. – 1975. – № 10. – С. 59–60.
17. Орехов А.Н., Номоконова Г.Г. Природа аномалий физических полей Верхне-Енашиминского рудного района // Геофизические исследования в Средней Сибири: сб. научн. тр. / гл. ред. А.Г. Еханян. – Красноярск: Изд-во КНИИГиМС, 1997. – С. 202–206.
18. Алексеева А.К., Шолпо Л.С. Петромагнитная типизация пород черносланцевых золотоносных толщ // Физ. Земли. – 1995. – № 2. – С. 84–90.
19. Алексеева А.К., Кременецкий А.А. Природа петрофизических неоднородностей в разрезах золоторудных черносланцевых толщ // Геофизические исследования на твердые полезные ископаемые: тезисы докладов Международной геофизической конференции. – СПб., 2–6 октября 2006. – СПб.: ООО «Издательство Welcome», 2006. – С. 212–213.
20. Ерофеев Л.Я., Номоконова Г.Г., Орехов А.Н. Петрофизические условия локализации месторождений золота в углеродистых породах // Геофизические методы при разведке недр и экологических исследованиях: матер. Всеросс. научно-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – С. 207–212.

21. Гусев А.И. Геолого-генетическая модель Синюхинского золото-медно-скарнового месторождения // Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых: Матер. науч. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2000. – С. 104–108.
22. Приходько А.Ю. Условия формирования золоторудных месторождений по геофизическим данным // Геофизические исследования на твердые полезные ископаемые: тезисы докладов Международной геофизической конференции. – СПб., 2–6 октября 2006. – СПб.: ООО «Издательство Welcome», 2006. – С. 284–285.
23. Новиков И.П. Характеристика Балецкого рудного поля с геофизической точки зрения // Известия Томского политехнического института. – 1970. – Т. 18. – С. 50–57.

Поступила 29.04.2013 г.

UDC 550.83:550.814:553.41

GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL CONDITIONS AT SIBERIAN GOLDEN ORE FIELDS

Leonid Ya. Erofeev,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30.
E-mail: erofeev_leonid@tpu.ru

Aleksandr N. Orekhov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30.
E-mail: orekhovan@mail.tomsknet.ru

The urgency of the discussed issue is caused by the need to improve the effectiveness of geological prospecting when studying golden ore deposits.

The main aim of the study is to identify the opportunities of geophysical methods in prospecting, exploration and exploitation of Siberian golden ore fields.

The methods used in the study: data collection, analysis and synthesis of the results of previously performed geophysical studies in Siberian golden ore deposits mainly related to the problems of their typing; analysis of the main physical and geological environments for Siberian golden ore deposits. The authors have used both published data and materials of their own field geophysical work carried out in the East and West Sayan, Kuznetsk Alatau, the Yenisei Ridge, Baikal mountain area, as well as the part of the Trans-Baikal Mongolia-Okhotsk ore belt.

The results: The authors have proposed the geophysical typing of Siberian golden ore objects, established on the basis of determining the characteristics of their manifestation in the physical fields on the background of the host rocks. For each identified type the key disturbing factors were determined. The efficiency of geophysical methods in the study of gold objects for each of the environments is characterized.

Key words:

Systematization of ore fields, golden ore deposits, geophysical methods of prospecting and exploration, magnetic prospecting, electrical prospecting, gamma spectrometry.

REFERENCES

1. Benevolsky B.I., Blinov E.V., Brazhkin A.V., Vartanian S.S., Krivtsov A.I., Krytnya E.E., Lobach V.I., Mikhailova M.S., Myzenkova L.F., Novikov V.P., Storozhenko A.A., Chanysheva I.S. *Metodycheskoye rukovodstvo po otsenke prognoznnykh resursov almazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov. Vypusk «Zoloto»* [Methodological guidance on the assessment of expected resources of diamonds, precious and nonferrous metals. Issue «Gold»]. Moscow, TSNIIGRI Publ., 2010. 182 p.
2. Spiridonov A.M., Zorina L.D. Geologo-geneticheskiye modeli zolotorudnykh mestorozhdeniy Zabaikalskoy chasti Mongolo-Ochotskogo skladchatogo poyasa [Geological-genetic models of the golden ore deposits of the Trans-Baikal Mongolia-Okhotsk fold belt]. *Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 11, pp. 1158–1168.
3. Roshchektaev N.A. *Zoloto Buryatii* [Gold of the Buryatia]. Ulan-Ude, BNC SORAN Publ., 2000. Vol. 1, 463 p.
4. Kornev T.Ya. *Metallogeniya zolota zelenokamennykh poyasov Vostochnogo i Zapadnogo Sayana* [Gold metallogeny of greenstone belts of Eastern and Western Sayan]. Krasnoyarsk, KNIIG-GiMS Publ., 2010. 227 p.
5. Seminskiy G.V., Philonyuk V.A., Korzh V.V. *Modeli rudnykh rayonov i mestorozhdeniy Sibiri* [Models of the ore regions and fields of Siberia]. Moscow, Nedra Publ., 1994. 252 p.
6. Chuprov V.V. Geologo-geofizicheskaya klassifikatsiya rudnykh obektov pri obshchikh i detalnykh poiskakh [Geological and geophysical classification of ore objects in general and detailed search]. *Soviet geology*, 1982, no. 4, pp. 24–28.
7. Soloviev G.A. Petrofizicheskaya klassifikatsiya rudnykh mestorozhdeniy [Petrophysical classification of ore deposits]. *Geology and Exploration*, 1991, no. 6, pp. 22–29.
8. Ruderman E.N. K sozdaniyu sistemy obnaruzheniya zolotorudnykh metasomatitov geofizicheskimi metodami [On development of the system for detecting gold ore metasomatites by geophysical techniques]. *Geology and Exploration*, 1990, no. 5, pp. 122–128.
9. Erofeev L.Ya., Orekhov A.N. Magnito-geologicheskie modeli rudnykh tel i vozmozhnosti magnitometrii pri ikh razvedke [Magnetic

- ic-geological models of the golden ore bodies and magnetic survey opportunities for their exploration]. *Mineragenia Severo-Vostochnoy Asii. Trudy II Vserossiyskoy nauchno-practicheskoi konferentsii* [Proc. II Russian Conf. Mineragenia of the Nord-East Asia]. Ulan-Ude, 2011, pp. 46–47.
10. Solodov A.A. Primenenie elektrorazvedki pri poiskakh zolotorudnykh mestorozhdeniy Darasunskogo tipa v Vostochnom Zabaikalye [Application of the electrical prospecting for searching Darasunsky type golden ore deposits in East Zabaikalye]. *Proc. TSNI-GRI*, 1962, Iss. 51, pp. 42–51.
 11. Seyfullin R.S., Sidelnikov U.Z. Geologo-geofizicheskie modeli zolotorudnykh mestorozhdeniy Zabaikalia [Geological and geophysical models of the Zabaikalye golden ore deposits]. *Geology and Geophysics*, 1978, no. 9, pp. 103–108.
 12. Antonov V.V. Geofizicheskie metody pri poiskakh i razvedke zolotorudnykh mestorozhdeniy [Geophysical methods in searching and prospecting the golden ore deposits]. *Poiski mestorozhdeniy tverdykh poleznykh iskopayemykh geofizicheskimi metodami: sbornik nauchnykh trudov* [Search for mineral deposits by the geophysical methods: Collection of the Scientifics Proc.]. Moscow, Nauka Publ., 1979, pp. 108–119.
 13. Erofeev L.Y., Orekhov A.N. Fizicheskie svoystva porod i orudnenie zoloto-kvarts-sulfidnykh mestorozhdeniy [Physical properties of the rocks and mineralization of the gold-quartz-sulfide deposits]. *Zoloto Sibiri i Dalnego Vostoka: Trudy III Vserossiyskogo Simpoziuma* [Gold of the Siberia and far East: Proc. III Russian Symp. with Int. Part.]. Ulan-Ude, 2004, pp. 71–74.
 14. Kiselev M.I. Ratsionalny kompleks geofizicheskikh metodov pri poiskakh i razvedke zolotorudnykh mestorozhdeniy [Rational complex of the geophysical methods in searching and prospecting golden ore deposits]. *Exploration and protection of natural resources*, 1973, no. 8, pp. 31–36.
 15. Altshuller M.I. Fiziko-radiogeokhimicheskaya zonalnost rudnykh poley zoloto-kvartsevykh mestorozhdeniy [Physical and radiochemical zoning of the ore fields of the gold-quartz deposits]. *Metody razvedochnoy geofiziki: sbornik nauchnykh trudov* [The Method of the exploration geophysics: Collection of the Scientifics Proc.]. Leningrad, NPO «Rudgeophysics» Publ., 1982, pp. 13–23.
 16. Feldman A.A. Primenenie gammaskopimetrii pri poiskakh zolotorudnykh mestorozhdeniy blizpoverkhnostnogo tipa [Gamma spectrometry application for searching near surface golden ore deposits]. *Exploration and protection of natural resources*, 1975, no. 10, pp. 59–60.
 17. Orekhov A.N., Nomokonova G.G. Priroda anomaly fizicheskikh poley Verkhne-Enashiminskogo rudnogo rayona [The origin of anomalies of physical fields in Verkhne-Enashiminsky ore region]. *Geofizicheskie issledovaniya v Sredney Sibiri: sbornik nauchnykh trudov* [Geophysical exploration in the Central Siberia: Collection of the Scientifics Proc.]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Publ., 1997, pp. 202–206.
 18. Alekseeva A.K., Sholpo L.S. Petromagnitnaya tipizatsiya porod chernoslantsevykh zolotonosnykh tolshch [Petromagnetic typing of black shale rock of the gold-bearing stratum]. *Physics of the Earth*, 1995, no. 2, pp. 84–90.
 19. Alekseeva A.K., Kremenetsky A.A. Priroda petrofizicheskikh neodnorodnostey v razrezakh zolotorudnykh chernoslantsevykh tolshch [The origin of petrophysical heterogeneities in cuts of the gold-bearing stratum]. *Geofizicheskie issledovaniya na tverdye poleznye iskopaemye: tezis dokladov mezhdunarodnoy geofizicheskoy konferentsii* [Geophysical exploration for solid mineral resources: Abstr. of the Intl. Geophysical Conf.]. Saint-Petersburg, Welcome Publ., 2006, pp. 212–213.
 20. Erofeev L.Ya., Nomokonova G.G., Orekhov A.N. Petrofizicheskie uslovia lokalizatsii mestorozhdeniy zolota v uglerodistykh porodakh [Petrophysical conditions of golden ore deposits localization in carbonaceous rocks]. *Geofizicheskie metody pri razvedke nedr i ekologicheskikh issledovaniyakh: materialy Vserossiyskoy nauchotekhnicheskoy konferentsii* [Geophysical methods for exploring mineral resources and environmental studies: Proc. All Russian scient. and techn. conf.]. Tomsk, TPU Publ., 2003, pp. 207–212.
 21. Gusev A.I. Geologo-geneticheskaya model Sinukhinskogo zolotomedno-skarnovogo mestorozhdeniya [Geological-genetic model of Sinyuhinskoe golden-copper-skarn deposit]. *Poiski i razvedka mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh: Materialy nauchoy konferentsii* [Prospecting and Exploration of the Mineral Deposits: Proc. Scient. Conf.]. Tomsk, TPU Publ., 2000, pp. 104–108.
 22. Prikhodko A.Yu. Uslovia formirovaniya zolotorudnykh mestorozhdeniy po geofizicheskim dannym [Conditions for golden ore deposits formation by geophysical data]. *Geofizicheskie issledovaniya na tverdye poleznye iskopaemye: tezis dokladov mezhdunarodnoy geofizicheskoy konferentsii* [Geophysical exploration for solid mineral resources: Abstr. of the Intl. Geophysical Conf.]. Saint-Petersburg, Welcome Publ., 2006, pp. 284–285.
 23. Novikov I.P. Kharakteristika Baleyevskogo rudnogo polya s geofizicheskoy tochkoy zreniya [Bailey ore field characteristic via geophysical perspective]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1970, vol. 18, pp. 50–57.

Геофизика

УДК 553.98:552.578.2

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ КЕРНА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АНИЗОТРОПИИ КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТИ И ГАЗА

Коровин Михаил Олегович,

инженер лаборатории геологии месторождений нефти и газа Центра подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: korovinmo@hw.tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью достижения максимальной выработки запасов по существующим месторождениям при увеличивающемся истощении запасов путём выбора наиболее оптимальной стратегии разработки.

Цель работы: рассмотреть вопросы изучения пространственной анизотропии петрофизических свойств коллекторов лабораторными методами.

Методы исследования: Образцы подвергались температурному размагничиванию, и затем проводились измерения остаточной намагниченности с определением направления пространственной ориентировки керна. По ориентированным образцам были проведены пространственные измерения акустических и магнитных свойств. Дополнительные исследования по фотографическому сканированию отражают визуальное распределение изменения свойств и обстановок осадконакопления.

Результаты: Полученные результаты исследования показывают существующую корреляцию магнитных, акустических свойств и проницаемости образцов керна и позволяют предсказать направление улучшенной фильтрации. Выявлена зависимость между характеристиками строения породы и фильтрационно-ёмкостными свойствами пород-коллекторов.

Ключевые слова:

Анизотропия, проницаемость, магнитные свойства, акустические свойства, фотографическое сканирование, фактор Кёнигсбергера, лабораторные исследования керна.

Обломочные горные породы являются самыми распространёнными породами-коллекторами нефти и газа в Западной Сибири. Условия формирования таких пород определяют неоднородность строения коллектора, которая оказывает непосредственное влияние на величину, извлекаемость запасов и технологическую разработку месторождений [1, 2].

Наличие неравномерно ориентированных по азимуту неоднородностей в структуре пород обуславливают образование направлений, по которым отмечаются повышенные внутрипластовые и межпластовые перетоки углеводородов. Это подтверждается фактическими дебитами на разных месторождениях. Колебания значений дебитов, изменения режимов работы нагнетательных скважин, различия в фильтрационных свойствах пород – всё это также свидетельствует о существовании и непосредственном влиянии анизотропии свойств геологического разреза на величину проницаемости в зависимости от направления [3].

Анизотропия предопределяется ходом осадконакопления, последующими тектоническими воздействиями, процессами выщелачивания и карбонатизации [4].

В комплексе все эти факторы формируют неоднородность коллектора, и каждый из них в своей мере обуславливает упорядоченность текстурных и структурных особенностей пород-коллекторов, тем самым оказывая непосредственное влияние на физические свойства, и, естественно, на нефтеотдачу. Таким образом, для выбора наиболее эффективной системы разработки необходимо производить учёт и оценку влияния анизотропии пород на технологию эксплуатации месторождений [3]. Для анализа неоднородностей необходимо проводить исследования на пространственно ориентированном керне. В этом случае возможно непосредственное определение фильтрационных свойств путём измерения проницаемости на специально выпиленных образцах. При подготовке экспериментальных образцов желательно заранее определить

направление петрофизической анизотропии. В настоящей работе рассматривается методология комплексной оценки петрофизических параметров, позволяющих решать эту задачу. Работы по изучению анизотропии проводились автором с последующей обработкой полученной информации и дополнительными расчётами в период с 2006 по 2013 гг. [5, 6].

Последовательность решения проблемы представляется следующей:

1. Восстановление ориентировки керна является первым этапом при оценке анизотропии и представляет собой азимутальное распределение улучшенных коллекторских свойств образца керна, извлечённого из продуктивного пласта.
2. Анализ петрофизических параметров, отражающих общую анизотропию коллектора.
3. Сопоставление полученных данных с геологическими особенностями пород коллекторов и фильтрационными свойствами [7].

Количественную оценку величины и направления анизотропии проницаемости представляется возможным определить с помощью исследований керна, геофизических исследований скважин, а также гидродинамических исследований. В дополнение необходимо использовать петрофизические параметры, которые позволяют выделить векторные изменения свойств пород [3, 8].

Таких дополнительных характеристик три: магнитные, акустические, электрические. Из них активно используются только две: магнитные (остаточная намагниченность, магнитная восприимчивость) и акустические, как наиболее легко реализуемые [3].

Для решения первой задачи целесообразно применить палеомагнитный метод. В основу ориентации изучаемых образцов керна относительно сторон света положена их остаточная намагниченность. Известно, что породы земной коры обладают намагниченностью, обусловленной направлением магнитного поля Земли, которое существовало во времена образования породы. Она связана с географическим положением древнего магнитного полюса. Остаточная намагниченность (естественная) позволяет выполнить ориентирование керна в пространстве с применением палеомагнитной технологии, а магнитная восприимчивость, в свою очередь, характеризуется свойством анизотропии, которая также зависит от порядка строения магнитных частиц при осадконакоплении и формировании скелета породы. Соответствующие подходы позволяют избежать многочисленного выбуривания уменьшенных образцов керна для проведения лабораторных исследований, снижая тем самым стоимость определения направления анизотропии [3, 9].

При применении *палеомагнитной* ориентации керна используются два способа:

1. Определение направления компонента естественной остаточной намагниченности, который характеризует первоначальную намагниченность образца.

Для её определения необходимо с помощью переменного магнитного поля и температуры разрушить накопленную намагниченность образца за время его существования [2, 4]. При сопоставлении направления древнего магнитного поля и направления стабильного компонента можно определить первоначальную ориентировку образца (рис. 1). В соответствии с этим способом для образца керна необходимо знать ориентировку керна «верх–низ» относительно оси скважины и возраст пород. Способ находит применение при проверке сходимости полученных результатов [9].

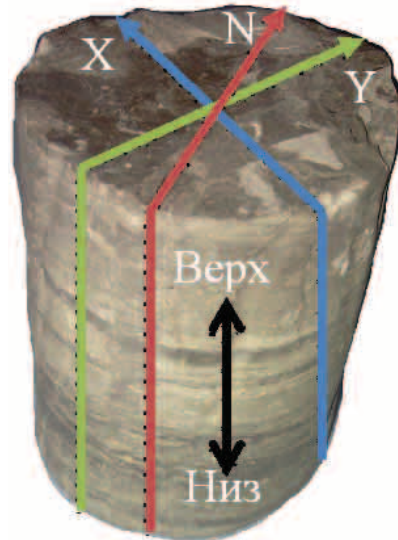


Рис. 1. Применение метода палеомагнитного ориентирования: X, Y, Z – система координат образца керна, N – вязкая намагниченность расчётной плоскости магнитного меридиана

2. При проведении второго способа используется направление не первичной, а вторичной (вязкой) намагниченности, которая была накоплена породой во время воздействия геомагнитного поля после последней инверсии (в течение последних 780 тысяч лет). Направление этого компонента должно отражать направление современного поля в точке проведения измерений.

Так как этот компонент менее стабилен, то его можно отделить в результате постепенного размагничивания переменным магнитным полем или температурой. При сопоставлении направлений современного геомагнитного поля и вязкой составляющей намагниченности представляется возможным определить ориентировку образца во время его формирования. В этом случае не обязательно знать, как образец располагался в вертикальном разрезе (достоверность расположения кровли и подошвы), так как современная полярность магнитного поля известна. Способ находит применение при ориентации образцов керна [2].

Компонентный состав намагниченности изучаемых образцов определялся в процессе ступенчатого терморазмагничивания в экранированной печи

системы В.П. Апарина. Измерения производились на астатическом магнитометре МАЛ-036. Интерпретация результатов проводилась с помощью пакета стандартных программ.

В результате в большинстве случаев выделяют следующие температурные диапазоны, при которых разрушается намагниченность:

- 1) малых температур (до 80...120 °С);
- 2) средних температур (от 80 до 160...200 °С);
- 3) высоких температур (выше 200 °С).

Наибольший интерес для магнитного ориентирования керна представляет среднетемпературный компонент, потому что современное геомагнитное поле по направлению совпадает с измеряемым компонентом, называемым вязкой намагниченностью [2].

Проверка точности используемой методики ориентирования, проведенная на образце керна Оренбургского месторождения, отобранного с помощью специального керноотборного снаряда и имеющего механическую отметку «север-юг», показала весьма близкое совпадение результатов (различие не превысило 2 %) [2].

Лабораторное определение остаточной намагниченности и является инструментом для пространственного ориентирования образцов керна, причем не только по отношению положения древнего магнитного полюса, но и по отношению к его современному местонахождению. Для непосредственного измерения используются как полноразмерные, так и выпиленные из керна (перпендикулярно напластованию) образцы цилиндрической формы высотой 22 мм и диаметром 25,4 мм. Упомянутые образцы являются смежными с теми, что служат для изучения упруго-деформационных свойств: нанесенная на них условная линия со стрелкой является общей. Упомянутая линия служит условно выбранным направлением оси «х», к которой привязываются при исследовании оси главных напряжений и их азимут [2, 10].

Подготовленные образцы в течение 10–15 суток выдерживаются «по полю» (нанесенную на цилиндр стрелку направляли на север). Таким образом, снимается «лабораторная» намагниченность, полученная в результате транспортировки, хранения и обработки исходных кернов.

Для проведения исследований *акустическими* методами применялся ультразвуковой прибор УК-14П. Рассмотрим устройство и принцип работы прибора.

Прибор реализует ультразвуковой импульсный метод с отдельным вводом в материал и последующим приемом прошедших через него УЗК.

При двухстороннем доступе к изделию с помощью излучающего и приёмного преобразователей осуществляется сквозное прозвучивание, при одностороннем доступе прозвучивание осуществляется путем установки преобразователей на одной поверхности. В приборе предусмотрены два режима работы. В одном режиме работы прибор автоматически измеряет время, требуемое переднему

фронту ультразвукового импульса для прохождения через материал образца, в соответствии с которым происходит расчёт скорости акустических волн. В другом режиме работы прибор измеряет длительность фронта первой полуволны принятого ультразвукового импульса.

Этапы проведения работы заключались в определении пространственной анизотропии с поворотом цилиндрического образца через каждые 22,5°. Принципиальная схема измерения – на рис. 2.

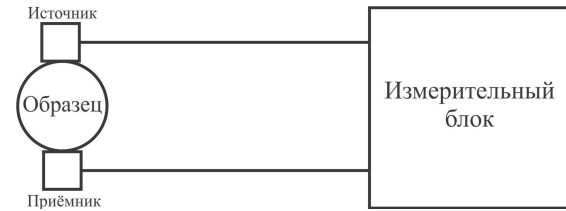


Рис. 2. Схема снятия показаний с помощью прибора УК-14П

С помощью прибора были получены следующие параметры (таблица).

Таблица. Параметры акустических измерений

Параметр	Расшифровка	Формула
t	Время прохождения ультразвуковой волны от источника до приёмника через образец	–
τ	Длительность фронта ультразвуковой волны	–
V	Скорости прохождения ультразвуковых колебаний по формуле	$V=10^4/t$, l – ширина образца
K	Коэффициент анизотропии	$K=V_{\max}/V_{\min}$

Измерения анизотропии магнитной восприимчивости производилось на астатическом магнитометре МАЛ-036 путём последовательных поворотов и измерений образцов в равноудалённом положении.

В качестве результатов по *магнитным* исследованиям автором была выведена формула расчёта направления наилучшего изменения магнитной анизотропии. Эллиптическая модель наилучшим образом подходит для описания характера влияния анизотропии.

$$\sin^2(\beta - \alpha) \cdot \left(\frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2} \right) = \frac{1}{x^2} - \frac{1}{a^2},$$

где a – значение большой полуоси эллипса; b – значение малой полуоси эллипса; β – угол, соответствующий точке с экспериментальными данными; x – расчётное значение; α – угол, соответствующий углу наклона главной оси эллипсоида.

Разработанный и опробованный алгоритм позволяет при наличии одних только экспериментальных данных и соответствующих им углов определять направление индуктивной намагниченности керна и строить эллиптическую модель магнитной восприимчивости с удовлетворительной точностью.

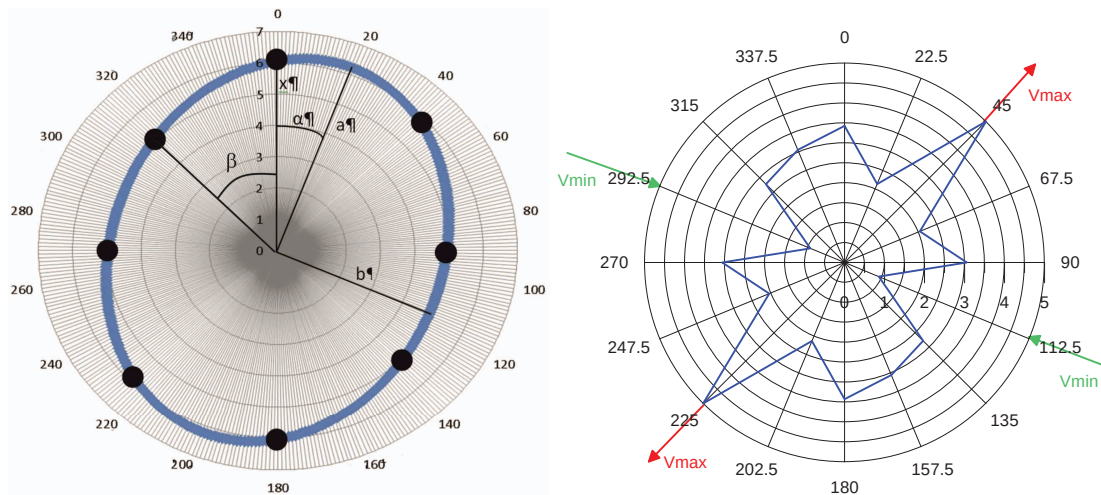


Рис. 3. Сопоставление результатов магнитных (a – значение большой полуоси эллипса; b – значение малой полуоси эллипса; β – угол, соответствующий точке с экспериментальными данными; x – расчётное значение; α – угол, соответствующий углу наклона главной оси эллипсоида) и акустических (зависимость скорости ультразвуковых колебаний от угла с вычитанием константы скорости) методов

Пространственная ориентировка керна в совокупности с эллиптической моделью однозначно выделяет упорядоченность структурных особенностей пород и анизотропию магнитных и упругих свойств в системах координат (географическая, магнитная).

В качестве результатов по **акустическим** методам рассчитывалась зависимость скорости УЗК от угла с вычитанием константы скорости (рис. 3). Дополнительным критерием оценки достоверности расчётов было сравнение результатов по магнитным и акустическим методам (рис. 3).

Для получения геологической информации из образца керна применяется фотосканирование и формирование фоторазвертки поверхности образца керна. На рис. 4 отчетливо видны следы слоистости, указывающие на направление изменения условий осадконакопления. На основании этих данных можно дать количественную оценку элементов залегания слоистости и трещиноватости (при её наличии). При большем количестве образцов керна можно более полно представить картину осадконакопления и определить направление улучшения коллекторских свойств в интересующем разрезе.

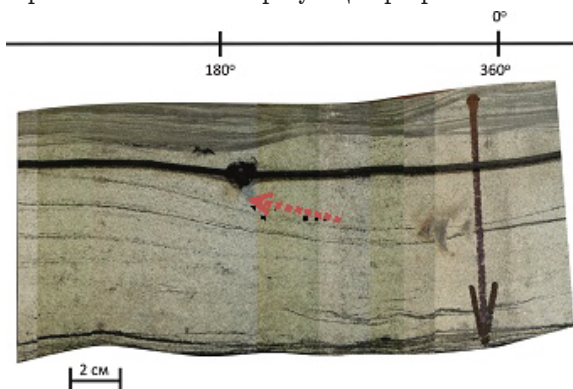


Рис. 4. Фоторазвертка образца керна (изменение направления слоистости)

Модель исследования неоднородности базируется на петрофизических измерениях кернового материала. Это позволяет применить изменения магнитных свойств при учёте анизотропии проницаемости. На рис. 5, 6 показаны зависимости проницаемости от фактора Кёнигсбергера (отношение остаточной намагниченности к индуцированной). На графиках отображена высокая корреляция данных, а это свидетельствует о наличии связи магнитной анизотропии с фильтрационной.

Выводы

1. Факты наличия анизотропии горных пород констатируются результатами магнитных и акустических измерений.
2. Различие анизотропных показателей для водонасыщенных и нефтенасыщенных пород свидетельствует о том, что анизотропия влияет на показания акустических методов. Вполне вероятно, это происходит из-за того, что нефть является сжимаемой жидкостью, а вода – нет.
3. Между пористостью, проницаемостью и средней скоростью прохождения упругой волны существует корреляционная связь.
4. Тип пористости не влияет на анизотропию магнитно-акустических свойств породы.
5. Согласно результатам, проведённым по анализируемой выборке, магнитная анизотропия существует наряду с анизотропией проницаемости, следовательно, оценить изменение проницаемости можно с помощью измерения анизотропии магнитной восприимчивости. Однако необходимо провести более обширные исследования и выяснить причину этого явления.
6. Метод фотографического сканирования керна позволяет качественно и количественно оценить направление изменения свойств и элементов залегания слоистости.

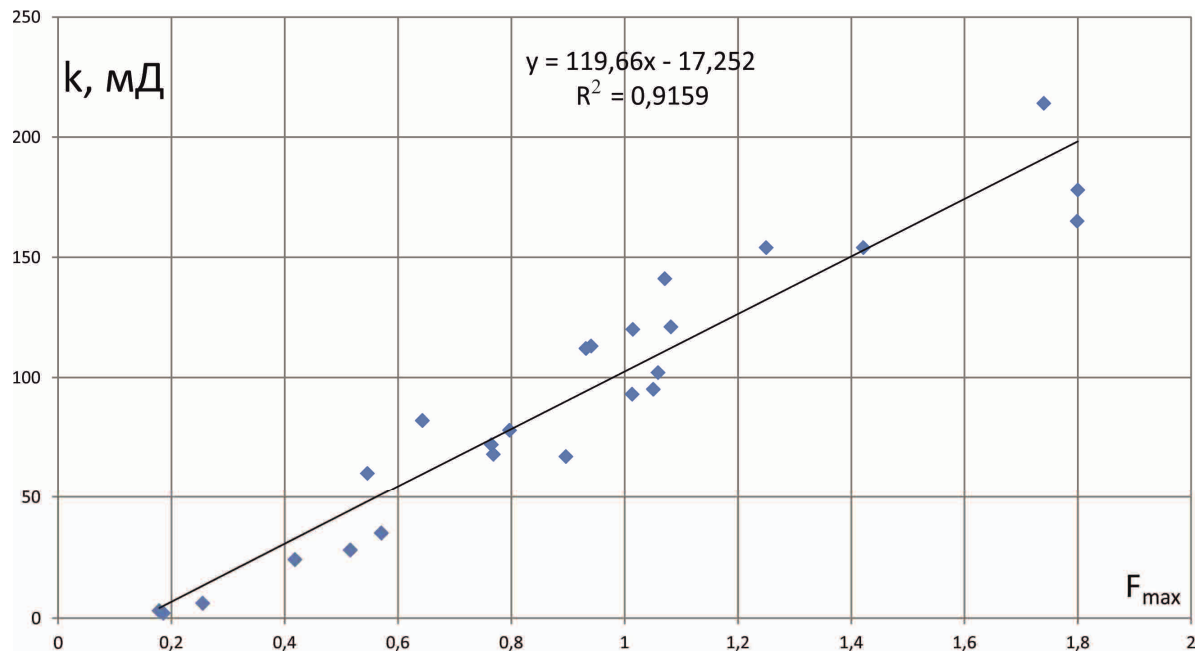


Рис. 5. Взаимосвязь магнитных и пластовых свойств (k – проницаемость; $F_{\max}$ – максимальный фактор Кёнигсбергера)

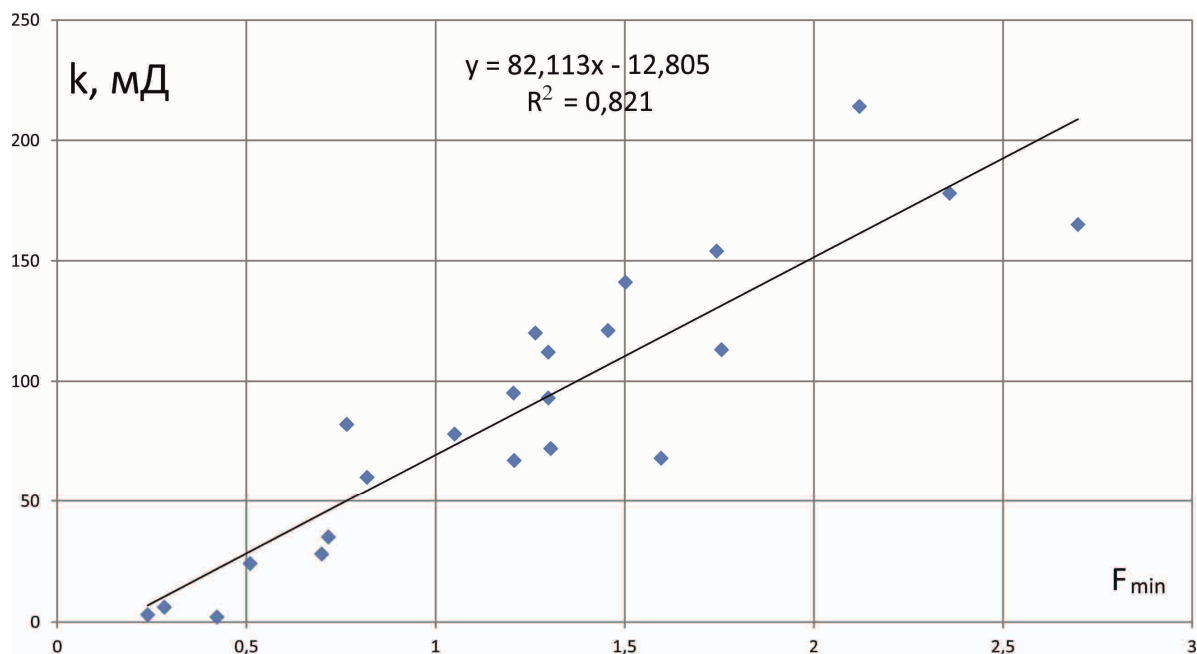


Рис. 6. Взаимосвязь магнитных и пластовых свойств (k – проницаемость; $F_{\min}$ – минимальный фактор Кёнигсбергера)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрофизика: справочник: в 3 кн. Кн. 1. Горные породы и полезные ископаемые / Н.Б. Дортман и др. / под ред. Н.Б. Дортман. – М.: Недра, 1992. – 390 с.
2. Семёнов В.В., Казанский А.Ю., Банников Е.А. Изучение анизотропии горных пород на керне и её ориентация в пространстве палеомагнитным методом // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2008. – № 1. – С. 18–23.
3. Усманов Р.Х., Талипов И.Ф., Азаматов М.А. Исследование направлений фильтрации и флюидомиграции при разработке месторождений с трудноизвлекаемыми запасами УВ // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2009. – № 1. – С. 63–66.
4. Злобин А.А., Лебедев С.В., Юшков И.Р. Определение осей анизотропии пустотного пространства горных пород // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2008. – № 8. – С. 66–70.
5. Korovin M. Investigation of the Acoustic and Petromagnetic Anisotropy of Oil Fields Rocks // 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC. London 2013. Extended abstract. Publication date: 10.06.2013. URL: <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=68815> (дата обращения: 30.09.2013).

6. Korovin M. Investigation of the Spatial Heterogeneity Petromagnetic Properties of Oil Fields Rocks // 73rd EAGE Conference & Exhibition, Extended abstract. Vienna, 2011. Publication date: 23.05.11. URL: <http://earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=50945> (дата обращения: 30.09.2013).
7. Методика и результаты изучения анизотропии верхнеюрских коллекторов (на примере Крапивинского месторождения углеводородов) / Д.В. Александров, В.П. Меркулов, Л.А. Краснощёкова, Т.Е. Мартынова, Ю.Я. Ненахов // Геофизические методы при разведке недр и экологических исследованиях. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – С. 114–119.
8. Меркулов В.П., Краснощёкова Л.А. Исследование пространственной литолого-петрофизической неоднородности продуктивных коллекторов месторождений нефти и газа // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 6. – С. 296–303.
9. Храмов А.Н., Шолпо Л.Е. Палеомагнетизм. Принципы, методы и геологические приложения палеомагнитологии. – Л.: Недра, 1967. – 252 с.
10. Петрофизика: Справочник. В 3 кн. Кн. 2. Техника и методика исследований / под ред. А.А. Молчанова, Н.Б. Дортман. – М.: Недра, 1992. – 256 с.

Поступила 14.10.2013 г.

UDC 553.98:552.578.2

SPECIAL CORE ANALYSIS TO STUDY OIL AND GAS RESERVOIR ANISOTROPY

Mikhail O. Korovin,

Tomsk Polytechnic University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: korovinmo@hw.tpu.ru.

Relevance of the work is caused by the need to maximize production of reserves from existing fields with increasing depletion by selecting the most appropriate development strategy.

Objective: To consider the study issues of the spatial anisotropy of reservoir petrophysical properties by the laboratory methods.

Methods: The samples were subjected to thermal demagnetization, and then the residual magnetization was measured to determine the direction of core spatial orientation. Spatial measurements of acoustic and magnetic properties were carried out by the oriented samples. Additional research on the photographic scanning reflects visual distribution of changes in sedimentary properties and environments.

Results: The obtained results show the significant correlation of magnetic and acoustic properties and permeability of the core samples and allow predicting the direction of improved filtering. The author found out the relationship between rock structure characteristics and permeability and porosity of reservoir rocks.

Key words:

Anisotropy, magnetic properties, acoustic properties, photographic scanning, Koenigsberger factor, laboratory core analysis.

REFERENCES

1. Dortman N.B. *Petrofizika: spravochnik. Gornye porody i poleznye iskopaemye* [Petrophysics: handbook. Rocks and minerals]. Moscow, Nedra, 1992. 390 p.
2. Semyonov V.V., Kazanskiy A.Yu., Bannikov E.A. Izucheniye anizotropii gornyykh porod na kerne i ee orientatsiya v prostranstve paleomagnitnym metodom [Study of the anisotropy of rocks at the core and its orientation in space paleomagnetically]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2008, no. 1, pp. 18–23.
3. Usmanov R.Kh., Talipov I.F., Azamatov M.A. Issledovanie napravleniy filtratsii i flyuidomigratsii pri razrabotke mestorozhdeniy s trudnoizvlekaemymi zapasami UV [Study the directions of filtering and fluid migration at mining stocks with hard hydrocarbons]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2009, no 1, pp. 63–66.
4. Zlobin A.A., Lebedev S.V., Yushkov I.R. Opredeleniye osey anizotropii pustotnogo prostranstva gornyykh porod [Determination of the anisotropy axes of the void space rocks]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2008, no. 8, pp. 66–70.
5. Korovin M. *Investigation of the Acoustic and Petromagnetic Anisotropy of Oil Fields Rocks* // 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC. London 2013. Extended abstract. Publication date: 10.06.2013. Available at: <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=68815> (accessed 30.09.2013).
6. Korovin M. *Investigation of the Spatial Heterogeneity Petromagnetic Properties of Oil Fields Rocks* // 73rd EAGE Conference & Exhibition, Extended abstract. Vienna, 2011. Publication date: 23.05.11. Available at: <http://earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=50945> (accessed 30.09.2013).
7. Aleksandrov D.V., Merkulov V.P., Krasnoshchekova L.A., Martynova T.E., Nenakhov Yu.Ya. Metodika i rezultaty izucheniya anizotropii verkhneyurskikh kolektorov (na primere Krapivinskogo mestorozhdeniya uglevodorodov) [The methodology and results of a study of the Upper Jurassic reservoir anisotropy (by the example of Krapivinskoye hydrocarbon deposit)]. *Geofizicheskie metody pri razvedke neдр i ekologicheskikh issledovaniyakh* [Geophysical methods in exploration of mineral resources and environmental studies]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2003. pp. 114–119.
8. Merkulov V.P., Krasnoshchekova L.A. Issledovanie prostranstvennoy litologo-petrofizicheskoy neodnorodnosti produktivnykh kolektorov mestorozhdeniy nefi i gaza [Investigation of the spatial heterogeneity of lithologic and petrophysical productive reservoirs of oil and gas]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no 6, pp. 296–303.
9. Hramov A.N., Sholpo L.E. *Paleomagnetizm. Printsipy, metody i geologicheskie prilozheniya paleomagnitologii* [Paleomagnetism. Principles, methods and geological applications of paleomagnetology]. Leningrad, Nedra, 1967. 252 p.
10. Dortman N.B. *Petrofizika: spravochnik. Tekhnika i metodika issledovaniy* [Petrophysics: handbook. Technology and research methods]. Moscow, Nedra, 1992. 256 p.

УДК 553.98:553.041:552.578:550.8.05

ПАЛЕОКЛИМАТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И РЕАЛИЗАЦИЯ ГЕНЕРАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА НЕФТЕМАТЕРИНСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ

Исаев Валерий Иванович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геофизики
Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: isaewi@tpu.ru

Рылова Татьяна Борисовна,

д-р геол.-минерал. наук, гл. науч. сотр. лаборатории геодинамики
и палеогеографии Института природопользования НАН Беларуси,
Республика Беларусь, 220114, г. Минск, ул. Скорины, 10.
E-mail: rylova@nature.basnet.by

Гумерова Альбина Альбертовна,

студент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых
Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: albina.gumerova.1991@mail.ru

Накоплен исследовательский материал, показывающий влияние векового хода температур на поверхности Земли на термическую историю глубокопогруженных нефтематеринских отложений, на реализацию их генерационного потенциала. Цель исследований – обобщение известных данных о мезозойско-кайнозойском климате юго-восточной части Западной Сибири и оценка влияния векового хода температур земной поверхности на геотермический режим, степень реализации нефтегенерационного потенциала баженовской свиты. «Местный» вековой ход температур земной поверхности для южной климатической зоны Западной Сибири построен на основе аналитической сводки позднечетвертичных палеоклиматических реконструкций А.А. Шарботяна (1974), реконструкций климатических условий мезозоя Н.А. Ясманова (1985), реконструкции палеоклиматов Сибири в меловом и палеогеновом периодах А.В. Гольберта (1977), истории климата Западной Сибири по В.А. Зубакову (1990) и установленных В.С. Волковой (2011) среднегодовых температур в палеогене и неогене Западной Сибири. Оценка влияния палеоклимата на термическую историю материнских отложений выполнена на основе верификации результатов палеотемпературного моделирования осадочного разреза глубокой скважины, вскрывшей баженовскую свиту на Пудинском мезоподнятии. Установлено, что реконструкции термической истории баженовских отложений без учета палеоклимата не согласуются с данными отражательной способности витринита и нефтегазонасностью разреза. Использование при реконструкциях «местного» векового хода температур земной поверхности существенно уточняет показатель плотности прогнозных ресурсов нефти. «Местный» вековой ход рекомендуется учитывать при оценке ресурсов углеводородов объемно-генетическим методом на землях Томской, Новосибирской и Омской областей.

Ключевые слова:

Палеоклимат, местный вековой ход температур земной поверхности, геотермический режим баженовской свиты, оценка ресурсов углеводородов, южная климатическая зона Западной Сибири.

Обзор проблемы

Палеореконструкции и прогноз изменения природной среды – многовековая проблема, занимающая умы естествоиспытателей. В последние два столетия эта многогранная проблема в полной мере присуща и исследованиям состояния литосферы, ее минеральных и энергетических ресурсов. В начале прошлого века А. Вегенер [1] одним из первых выполнил палеоклиматические реконструкции для решения геологических задач (обоснования гипотезы перемещения литосферных плит), а М. Миланкович [2] создал математическую (астрономическую) теорию колебаний климата.

В настоящее время результаты палеоклиматических реконструкций, восстанавливающие вековой ход изменения давления, влажности и температур на поверхности Земли, используются для

прогноза размещения гипергенных месторождений полезных ископаемых. Выполняются прогнозы разобщения зон преимущественной газонасности и нефтеносности структур земной коры, выполненные на анализе влияния палеоклимата на скорость и объемы седиментации. Вместе с тем за последние два десятилетия накоплен значительный исследовательский материал, показывающий влияние векового хода температур земной поверхности на термическую историю и глубокопогруженных нефтематеринских отложений, а следовательно, и на степень реализации их нефтегенерационного потенциала.

Ряд исследователей отмечают осложнение регионального теплового поля Урала и Сибири, вызванное особенностями климатической истории, что следует учитывать при характеристике температурного режима недр конкретных территорий

[3, 4 и др.]. Ученые и специалисты, занимающиеся моделированием термической истории осадочных бассейнов Западной Сибири и других нефтегазоносных провинций, рекомендуют учитывать вековой ход температур на поверхности Земли [5, 6 и др.]. Наряду с этим, при палеотемпературном моделировании разрезов глубоких скважин, расположенных на юго-востоке Западной Сибири, влияние резкого похолодания в плейстоцен-голоцене на геотермический режим материнских пород было оценено как маловероятное [7]. В некоторых работах [8 и др.] при реконструкции температурного режима нефтематеринских отложений вековой ход температур земной поверхности не учитывается.

Лобовой Г.А. с соавторами [9, 10], на основе многовариантного палеотемпературного моделирования осадочных разрезов глубоких скважин, установлено существенное влияние векового хода температур на поверхности Земли на термическую историю и реализацию нефтегенерационного потенциала верхнеюрскими отложениями баженовской свиты (J_3tt).

Постановка задачи

Цель исследований – обобщить известные данные о мезозойско-кайнозойском климате юго-восточной части Западной Сибири и оценить влияние векового хода температур поверхности Земли на геотермический режим, на степень реализации генерационного потенциала баженовской нефтематеринской свиты. Обобщенный вековой ход температур юго-восточной части Западной Сибири условно назовем «местным».

«Местный» вековой ход температур земной поверхности строится на основе обобщения (сводки) позднечетвертичных палеоклиматических реконструкций для Западно-Сибирской низменности А.А. Шарботяна [11], результатов реконструкции климатических условий мезозоя юга Западной Сибири Н.А. Ясманова [12], результатов реконструкции палеоклиматов Сибири в меловом и палеогеновом периодах по А.В. Гольберту с соавторами [13], истории климата Западной Сибири, начиная с позднего миоцена, по В.А. Зубакову [14], установленных В.С. Волковой трендов среднегодовых температур в палеогене и неогене Западной Сибири [15].

Оценка влияния палеоклимата на термическую историю материнских отложений выполняется на основе *верификации результатов* 3-х основных вариантов палеотемпературного моделирования: 1) палеоклимат не учитывается; 2) палеоклимат учитывается по «местному» вековому ходу температур, полученному для южно-сибирской климатической зоны (Широтное Приобье и южнее); 3) палеоклимат учитывается по вековому ходу температур, принятому при моделировании термической истории осадочных бассейнов Западной Сибири и других нефтегазоносных провинций России [5, 6]. Условно назовем этот ход «стандартным».

Моделирование геотермического режима баженовских отложений выполняется для осадочного разреза глубокой скважины Лугинецкая 183 (табл. 1) на Пудинском мезоподнятии (рис. 1).

Таблица 1. Характеристика разреза скважины Лугинецкая 183 (Пудинское мезоподняние)

Характеристики	Значение
Забой, м	2500
Отложения на забое (свита)	Тюменская
Кровля баженовской свиты, м	2313
Мощность баженовской свиты, м	16
Мощность палеогеновых отложений, м	356
Мощность неогеновых отложений, м	48
Мощность четвертичных отложений, м	50
Результаты испытаний (свита; пласт; тип флюида; дебит)	Васюганская; Ю ₂ ; нефть; 11, 5 м ³ /сут. Васюганская; Ю ₂ ; нефть; 13, 0 м ³ /сут.
Измеренные пластовые температуры (свита; глубина замера; пластовая температура)	Куломзинская; 2200 м; 77 °С Тюменская; 2350 м; 84 °С
«Измеренные» температуры по отражательной способности витринита (свита; глубина отбора; температура)	Васюганская; 2345 м; 98 °С

Построение векового хода палеотемператур на поверхности Земли (южная климатическая зона Западной Сибири)

В табл. 2 приведена сводка определений среднегодовых температур в мезозое и кайнозое южной климатической зоны Западной Сибири (северные широты 57...61°).

Шарботяном А.А. [11] исследовалась возможность образования многолетнемерзлых пород в четвертичное время. При моделировании на гидроинтеграторе для района 61° с.ш. (участок широтного течения Оби) на расчетный промежуток 245 тыс. лет в качестве верхних граничных условий задачи взят вековой ход температур на поверхности грунта. Вековой ход температур определен автором по кривой векового хода солнечной радиации (по М. Миланковичу) с учетом географических особенностей района (степень континентальности, соседство оледенения и пр.) в этот промежуток времени. Аналогично А.А. Шарботяном определен вековой ход температур на поверхности Земли для района 65° с.ш. и более высоких широт, существенно отличный от района 61° с.ш. Осредненные значения векового хода температур на широте 61° приведены в табл. 2, временной интервал отнесения значений – 0,02 млн лет.

Таблица 2. Определения среднегодовых температур в мезозое и кайнозое южной климатической зоны Западной Сибири

Время, млн лет назад	Температуры на поверхности Земли, °C	Авторы, источник данных
0	0	Шарбатян А.А. [11]
0,005	+3	
0,030	-2	
0,050	-1	
0,070	-4	
0,090	-1	
0,110	-4	
0,130	-1	
0,148	-4	
0,163	-5	
0,190	-9	
0,210	-6	
0,235	-10	
0,240	0	Зубаков В.А. [14]
2,2	+3	
2,4	0	
3,1	+2	
3,2	+2	
3,8	+14	Волкова В.С. [15]
3,9	+8	Зубаков В.А. [14]
4,8	+5	Волкова В.С. [15]
5,2	-3	Зубаков В.А. [14]
5,7	+7	
6,3	+10	
7,0	+4	
11,5	+6	
14	+7	Волкова В.С. [15]
20	+15	
32	+13	
33	+18	Ясаманов Н.А. [12]
34	+15	Волкова В.С. [15]
42	+11	
46	+8	
48	+17	Гольберт А.В. и др. [13]
50	+15	
55	+17	
58	+24	Волкова В.С. [15]
62	+20	
64	+26	Ясаманов Н.А. [12]
65	+17	Волкова В.С. [15]
73	+15	Гольберт А.В. и др. [13]
89	+17	
90	+26	
115	+17	Ясаманов Н.А. [12]
120	+18	Гольберт А.В. и др. [13]
178	+19	Ясаманов Н.А. [12]
202	+19	

Примечание: приведены осредненные значения среднегодовых температур на земной поверхности, указанные авторами в интервалах $\pm(1...2)^\circ$.

В.А. Зубаковым [14] рассмотрена история климата позднего миоцена и плиоцена южной части Западной Сибири и северной части Казахстана. Изучались древнеаллювиальные осадочные толщи и их магнитная восприимчивость. С применением палеомагнитного метода корреляции реконструированы зимние и летние температуры. При этом

были использованы палеоботанические и палеоклиматические параметры долины Среднего Иртыша, по В.С. Волковой и Н.А. Кульковой. Осредненные значения векового хода температур южной части Западно-Сибирской низменности в позднем неогене приведены в табл. 2, временные интервалы отнесения – 0,4 млн лет и меньше.

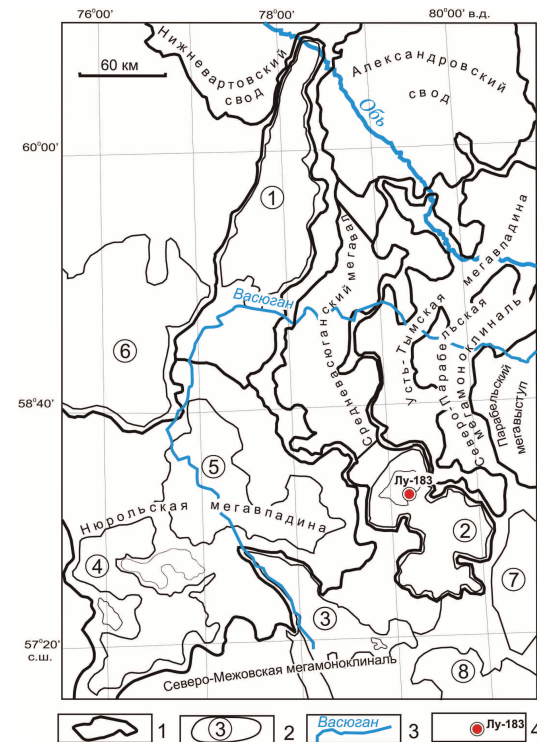


Рис. 1. Положение исследуемой скважины Лугинецкая 183 на обзорной тектонической схеме юго-востока Западной Сибири (на основе [16]): 1) структуры I порядка; 2) структуры II порядка: 1 – Колтогорский мезопрогиб, 2 – Пудинское мезоподнятие, 3 – Лавровский мезовыступ, 4 – Южно-Нурольская мезовпадина, 5 – Центральноноурольская мезовпадина, 6 – Нововасюганский мезовал, 7 – Горелоярское мезоподнятие, 8 – Калгачский мезовыступ; 3) реки; 4) исследуемая скважина

В.С. Волковой [15] использован палинологический материал по скважинам и разрезам западной и средней части Западной Сибири, выполнен анализ температур ареалов основных родов растений флоры, для оценки палеотемператур использован метод построения климатограмм В.П. Гринчука. Построены тренды [15] изменения среднезимних, среднелетних и среднегодовых температур, а также количества осадков в палеогене и неогене. В табл. 2 приведены температуры, соответствующие дискретным определениям значений среднегодовых температур палеогена и неогена Западной Сибири, временные интервалы отнесения – от 0,5 до 5 млн лет.

Н.А. Ясаманов [12] реконструировал климатические условия отдельных веков юрского, мелового и палеогенового периодов для северной и южной зон Западной Сибири. Для реконструкций исполь-

зована комплексная методика, в которой главная роль принадлежит данным литологии. Методика включает метод изотопной (по кислороду органических карбонатов) палеотермометрии и магнезиальный метод палеотермометрии (по отношению кальция к магнию в органическом кальците). В табл. 2 приведены осредненные определения палеотемператур, начиная с раннеюрской эпохи по середину олигоцена, для южной зоны Западной Сибири, временные интервалы отнесения определений – от 5 до 17 млн лет.

А.В. Гольберт с соавторами [13] дают развернутую характеристику палеоклимата мелового и палеогенового периодов Сибири, с выделением северо-сибирской, сибирской северной, сибирской южной и северо-казахстанской зон и подзон. Авторы использовали методы изотопной и магнезиальной палеотермометрии, а также данные палеоботаники и климатической интерпретации геологических формаций. В табл. 2 приведены среднегодовые температуры для сибирской южной подзоны, начиная с раннемеловой эпохи по эоценовую, временные интервалы отнесения температур – от 5 до 15 млн лет.

Для юго-восточной части Западной Сибири на рис. 2 изображен ход среднегодовых температур верхнего неоплейстоцена и голоцена, на рис. 3 – ход среднегодовых температур верхнего миоцена и плиоцена, на рис. 4 – ход среднегодовых температур юры, мела, палеогена и миоцена. Таким образом, построен «местный» вековой ход температур на поверхности Земли начиная с юрского времени – времени осадконакопления баженовской нефтематеринской свиты.

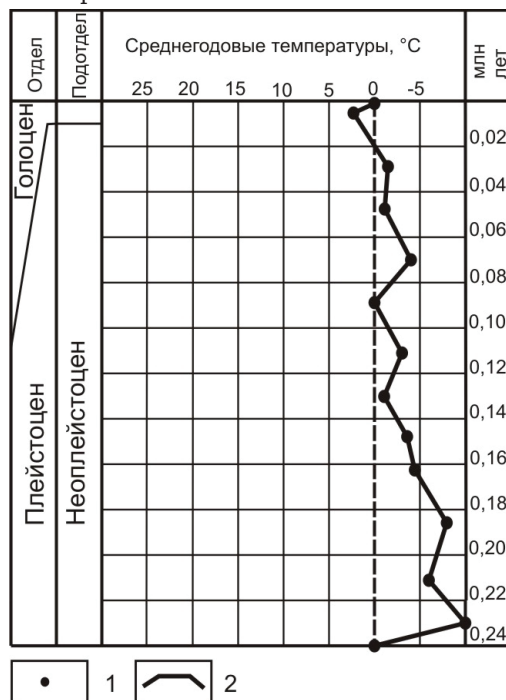


Рис. 2. Вековой ход температуры на поверхности Земли в неоплейстоцене и голоцене: 1) значения по А.А. Шарботяну (табл. 2); 2) кусочно-линейная аппроксимация среднегодовых температур



Рис. 3. Вековой ход температуры на поверхности Земли в верхнем миоцене и плиоцене: 1) значения по А.А. Шарботяну (табл. 2); 2) значения по Зубакову В.А. (табл. 2); 3) значения по В.С. Волковой (табл. 2); 4) кусочно-линейная аппроксимация среднегодовых температур

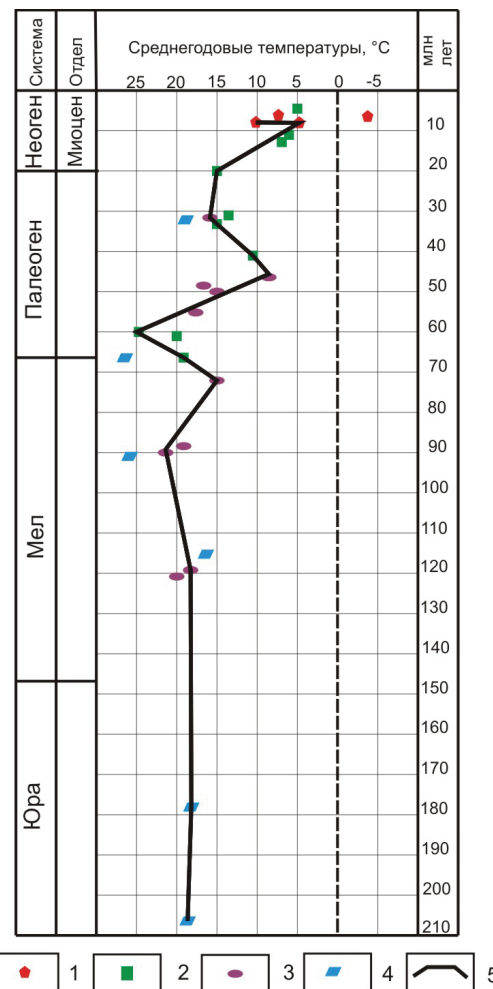


Рис. 4. Вековой ход температуры на поверхности Земли в юре, меле, палеогене и миоцене: 1) значения по В.А. Зубакову (табл. 2); 2) значения по В.С. Волковой (табл. 2); 3) значения по А.В. Гольберту и др. (табл. 2); 4) значения по Н.А. Ясаманову (табл. 2); 5) кусочно-линейная аппроксимация среднегодовых температур

Реконструкции термической истории баженовской свиты

Восстановление термической истории отложенной баженовской свиты выполнено на основе палеотектонических реконструкций и палеотемпературного моделирования [17]. *Первое краевое условие модели определяется температурой поверхности осадконакопления и задается в виде кусочно-линейной функции векового хода температур поверхности Земли.* Второе краевое условие модели определяется квазипостоянством значения плотности теплового потока из основания начиная с юрского времени [18].

Схема расчета палеотемператур состоит из двух этапов. На первом этапе по распределению измеренных температур в скважине решается обратная задача геотермии – рассчитывается плотность теплового потока через поверхность подстилающего основания. На втором этапе с известным значением теплового потока решаются прямые задачи геотермии – непосредственно рассчитываются геотемпературы в заданных точках осадочной толщи (баженовская свита) в заданные моменты геологического времени.

Расчеты геотемператур выполнены на 46 моментов геологического времени, для 4-х вариантов учета палеоклимата (табл. 3, 4). Заданные моменты геологического времени соответствуют временам «переломных» значений среднегодовых температур (рис. 2–4) и временам начала/завершения формирования каждой свиты осадочной толщи, перекрывающей отложения баженовской свиты. По геотемпературному критерию [19] выделены очаги интенсивной генерации баженовских нефтей.

Анализируя полученные расчетные геотемпературы (табл. 3), видим, что без учета палеоклимата, но с использованием в качестве измеренных и температуры по отражательной способности витринита (ОСВ), геотермические условия для интенсивной генерации нефти из РОВ баженовской свиты могли наступить 32 млн лет назад, после формирования чеганской свиты Pg_3-hq . Однако такой сценарий (вариант) термической истории неприемлем, т. к. расхождение расчетных геотемператур и «реперных» по ОСВ (природному «максимальному палеотермометру» [20]) слишком велико (табл. 4).

Если при палеотемпературном моделировании без учета палеоклимата данные ОСВ проигнорировать (как возможно недостоверные), то в таком варианте (табл. 3, 4) геотермические условия для интенсивной генерации нефти из РОВ баженовской свиты не наступают. Но в этом случае (без существования палеоочагов генерации нефти в модели) нельзя объяснить наличие залежи нефти в верхнеюрских отложениях (табл. 1). И такой вариант термической истории приходится исключить, как неадекватный «реперу» по ОСВ и установленной продуктивности разреза.

Таблица 3. Геотемпературы баженовской свиты в разрезе скважины Лугинецкая 183

Время, млн лет назад	Вековой ход температур на поверхности Земли, °С		Глубина положения баженовской свиты, м	Геотемпературы баженовской свиты*, °С			
	«местный»	«стандартный» [5, 6]		Без учета палеоклимата	Без учета палеоклимата (без учета данных ОСВ)	Учет палеоклимата («местный» ход температур)	Учет палеоклимата («стандартный» ход температур)
0	0	+2	2321	89	82	84	83
0,005	+3	+2	2320	89	82	84	83
0,03	-2	+2	2320	89	82	83	83
0,05	-1	+2	2320	89	82	83	83
0,07	-4	+2	2319	89	82	83	84
0,09	-1	+2	2319	89	82	84	83
0,11	-4	+2	2319	89	82	83	83
0,13	-1	+2	2319	89	82	83	83
0,15	-4	+2	2318	89	82	83	83
0,19	-9	+2	2318	89	82	84	83
0,21	-6	+2	2317	88	82	84	83
0,235	-10	+2	2317	88	82	84	83
0,24	0	+2	2317	88	82	85	83
1,64	+1	+2	2296	88	82	86	84
3,1	+2	+2	2295	88	81	87	85
3,2	+2	+2	2295	88	81	88	86
3,8	+12	+5	2295	87	81	86	87
4,7	+3	+4	2295	87	81	86	83
5,2	-3	+4	2294	87	81	85	82
5,7	+7	+4	2294	87	81	92	83
6,3	+10	+4	2294	87	81	93	83
7	+4	+4	2294	88	81	89	84
20	+15	+7	2294	88	81	99	87
24	+16	+8	2294	88	81	99	85
31,5	+17	+9	2218	85	78	98	87
32,3	+16	+10	2210	84	77	97	87
34	+15	+12	2200	84	77	96	87
37,6	+14	+15	2178	82	76	93	95
41,7	+12	+19	2154	82	75	90	95
42	+11	+20	2152	81	75	89	95
46	+8	+21	2129	81	74	84	94
54,8	+19	+21	2077	79	72	96	92
58	+24	+20	2058	78	72	98	91
61,7	+22	+20	2037	76	70	95	89
73	+15	+20	1899	71	65	83	83
73,2	+16	+20	1897	70	65	83	83
86,5	+22	+20	1735	64	59	83	78
89,8	+22	+20	1694	62	57	83	77
90	+23	+20	1692	62	57	83	77
91,6	+22	+20	1673	59	55	80	74
114,1	+21	+20	870	31	28	49	49
118	+19	+20	869	30	28	48	49
120,2	+19	+20	869	29	28	48	49
132,4	+19	+20	319	11	10	30	32
136,1	+19	+20	245	9	8	27	30
145,8	+19	+20	8	0,3	0,3	19	23
Расчетный тепловой поток из основания, мВт/м²				55,8	51,2	53,8	50,7

Примечание: коричневой заливкой обозначены времена палеотемпературных максимумов в баженовской свите, синей заливкой – температуры главной зоны нефтеобразования.

Варианты палеотемпературного моделирования с учетом палеоклимата (табл. 3) как по «местному» ходу температур на поверхности Земли, так и по «стандартному» ходу, вполне адекватны и измеренным пластовым температурам, и температуре, соответствующей ОСВ (табл. 4). Наличие палеоочагов интенсивной генерации нефти объясняет вскрытую залежь в верхнеюрских отложениях. Вместе с тем при учете палеоклимата по «стандартному» ходу температур земной поверхности «работа» палеоочага характеризуется прерывистостью (в интервале 7,0...3,8 млн лет назад) и он менее интенсивен по максимальным температурам.

Анализ результатов

Для количественного анализа вариативности 4-х сценариев термической истории материнских баженовских отложений для каждого варианта рассчитан (табл. 5) условный интегральный показатель относительной плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей R по формуле [21]:

$$R = \sum_{i=1}^n (U_i t_i 10^{-2}),$$

где U_i – расчётная температура очага генерации нефти в i -м интервале геологического времени, °C; t_i – время действия очага в i -м интервале, млн лет; количество расчетных временных интервалов $i=1, \dots, n$.

Таблица 4. Сопоставление измеренных и расчетных геотемператур

Глубина, м	Измеренные температуры, °C	Способ измерения	Расчетные (без учета палеоклимата), °C		Расчетные (без учета палеоклимата, без учета данных ОСВ), °C		Расчетные (учет палеоклимата, «местный» тренд температур), °C		Расчетные (учет палеоклимата, «стандартный» тренд температур), °C	
			Значение	Разница	Значение	Разница	Значение	Разница	Значение	Разница
2200	77	Пластовые	85	+8	78	+1	80	+3	80	+3
2350	84	Пластовые	90	+6	83	-1	85	+1	85	+1
2345	98	По ОСВ	84	-14	-	-	94	-4	93	-5

Примечание: принимая во внимание, что измеренные пластовые температуры и температуры по ОСВ получены с погрешностью $\pm(2...4)$ °C, то погрешность расчетных значений теплового потока (при решении обратной задачи) оценивается в $\pm(1...2)$ мВт/м² [22]. В свою очередь, погрешность расчетных значений геотемператур (при решении прямых задач) составляет те же $\pm(2...4)$ °C.

Из анализа содержания табл. 4, 5 однозначно следует, что реконструкции термической истории

материнских баженовских отложений без учета палеоклимата не согласуются с данными ОСВ и установленной нефтегазоносностью разреза. Использование при реконструкциях «местного» векового хода температур земной поверхности существенно (до 30 %) улучшает показатель плотности прогнозных ресурсов нефти, чем при использовании «стандартного» векового хода температур.

Таблица 5. Оценка относительной плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей для вариантов учета векового хода температур на поверхности Земли

Вариант	Расчетные ресурсы, усл. ед.	Количество расчетных временных интервалов (n)	Период работы палеоочага генерации нефти, млн лет назад	Время работы палеоочага, млн лет	Максимальные геотемпературы палеоочага, °C
Без учета палеоклимата	28	25	31,5...0,03	31,5	89
Без учета палеоклимата (без учета данных ОСВ)	–	–	–	–	–
Учет палеоклимата («местный» вековой ход температур на поверхности Земли)	67	22	61,7...0,24	61,5	99
Учет палеоклимата («стандартный» вековой ход температур на поверхности Земли)	49	15	61,7...20; 3,8...3,1	42,4	95

Примечание: принимая во внимание, что погрешность расчетных значений геотемператур очагов генерации нефти составляет $\pm(2...4)$ °C, т. е. порядка 2...4 %, то погрешность расчета ресурсов не превышает 5 %.

Представляется актуальным провести аналогичные исследования по сибирской климатической зоне (Тюменская область, Ханты-Мансийский АО) и по северо-сибирской климатической зоне (Ямало-Ненецкий АО).

Выводы

1. Проведена географическая и хронологическая увязка данных о вековом ходе температур на поверхности Земли по южной климатической зоне Западной Сибири. Определен «местный» вековой ход температур на поверхности Земли начиная с юрского времени.
2. Получена оценка существенного влияния палеоклимата на степень реализации генерационного потенциала баженовской свиты. «Местный» вековой ход температур на земной поверхности рекомендуется учитывать при оценке ресурсов углеводородов объемно-генетическим методом на землях Томской, Новосибирской и Омской областей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вегенер А. Происхождение материков и океанов. – М.; Л.: Гос. изд-во, 1925. – 145 с.
2. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. – М.; Л.: ГОНТИ, 1939. – 207 с.
3. Голованова И.В., Сальманова Р.Ю., Демежко Д.Ю. Реконструкция климата на Урале по геотермическим данным // Гео-логия и геофизика. – 2012. – Т. 53. – № 12. – С. 1776–1785.
4. Ерофеев Л.Я., Завидий Т.Ю. Определение поправки за палео-климатический фактор для коррекции результатов геотерми-ческих исследований // Геофизика. – 2010. – № 5. – С. 48–52.
5. Лопатин Н.В. Концепция нефтегазовых генерационно-акку-муляционных систем как интегрирующее начало в обоснова-нии поисково-разведочных работ // Геоинформатика. – 2006. – № 3. – С. 101–120.
6. Галушкин Ю.И. Моделирование осадочных бассейнов и оцен-ка их нефтегазоносности. – М.: Научный Мир, 2007. – 456 с.
7. Исаев В.И., Фомин А.Н. Очаги генерации нефтей баженовско-го и тогурского типов в южной части Нюрольской мегапавди-ны // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 6. – С. 734–745.
8. Малышев Н.А., Обметко В.В., Бородулин А.А. Опыт примене-ния технологии бассейнового моделирования в ОАО «НК-Рос-нефть» для оценки перспектив нефтегазоносности акваторий и выбора новых направлений геологоразведочных работ // Неф-тяное хозяйство. – 2012. – № 11. – С. 14–17.
9. Лобова Г.А. Влияние палеоклимата на геотермический режим баженовской свиты (центральная часть Западной Сибири) // Материалы за 8-а международна научна практична конферен-ция, «Образование и наука на XXI век». Т. 41. География и геология. – София: «Бял ГРАД-ДГ» ООД, 2012. – С. 58–61.
10. Влияние палеоклимата на геотермический режим и нефтегене-рационный потенциал баженовской свиты (на широтах Том-ской области) / Г.А. Лобова, Е.Н. Осипова, К.А. Криницина, Ю.Г. Останкова // Известия ТПУ. – 2013. – Т. 322. – № 1. – С. 45–50.
11. Шарбатян А.А. Экстремальные оценки в геотермии и геокрио-логии. – М.: Наука, 1974. – 123 с.
12. Ясманов Н.А. Реконструкции климатических условий мезозоя и кайнозоя Юга СССР // Методы реконструкции палеоклима-тов. – М.: Наука, 1985. – С. 179–184.
13. Палеоклиматы Сибири в меловом и палеогеновом периодах / А.В. Гольберт, К.Н. Григорьева, Л.Л. Ильенок, Л.Г. Маркова, А.В. Скуратенко, Ю.В. Тесленко. – М.: Недра, 1977. – 107 с.
14. Зубаков В.А. Глобальные климатические события неогена. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 223 с.
15. Волкова В.С. Стратиграфия и тренд палеотемператур в палео-гене и неогене Западной Сибири (по данным палинологии) // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 7. – С. 906–915.
16. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 253 с.
17. Исаев В.И. Интерпретация данных гравиметрии и геотермии при прогнозировании и поисках нефти и газа. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 172 с.
18. Ермаков В.И., Скоробогатов В.А. Тепловое поле и нефтегазо-носность молодых плит СССР. – М.: Недра, 1986. – 222 с.
19. Модель катагенеза органического вещества (на примере баже-новской свиты) / Л.М. Бурштейн, Л.В. Жидкова, А.Э. Контро-рович, В.Н. Меленевский // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 6. – С. 1070–1078.
20. Фомин А.Н. Катагенез органического вещества и нефтегазо-носность мезозойских и палеозойских отложений Западно-Си-бирского мегабассейна. – Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2011. – 331 с.
21. Лобова Г.А., Попов С.А., Фомин А.Н. Локализация прогноз-ных ресурсов нефти юрско-меловых нефтегазоносных ком-плексов Усть-Тымской мегапавдины // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 36–40.
22. Лобова Г.А. Оценка перспектив нефтегазоносности верхнеюр-ско-меловых отложений Усть-Тымской мегапавдины по ре-зультатам палеотемпературного моделирования // Вестник Воронежского государственного университета, серия: Геоло-гия. – 2012. – № 2. – С. 169–178.

Поступила 30.07.2013 г.

UDC 553.98:553.041:552.578:550.8.05

PALEOCLIMATE OF WESTERN SIBERIA AND IMPLEMENTATION OF GENERATIVE POTENTIAL OF OIL SOURCE DEPOSITS

Valery I. Isaev,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: isaewi@tpu.ru

Tatyana B. Rylova,

Dr. Sc., Institute of nature management of NAS, republic of Belarus,
Minsk, 220114, F. Skoriny street, 10. E-mail: rylova@nature.basnet.by

Albina A. Gumerova,

Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: albina.gumerova.1991@mail.ru

The research material which was gathered shows the influence of a century course of temperatures on the Earth surface on thermal history of deep-shipped oil source deposits, on implementation of their generative potential.

The purpose of the research is to summarize the known data on Mesozoic and Cainozoic climate of south-east part of Western Siberia and to assess the influence of a century course of temperatures on terrestrial surface on geothermal modes, the extent of implementation of petrogenitive potential of Bazhenov suite. The «local» century course of temperatures of terrestrial surface for the southern climatic zone of Western Siberia is constructed on the basis of the analytical report of Late Quarternary paleoclimatic reconstruction by A.A. Sharbotyan (1974), the reconstructions of climatic conditions of the Mesozoic by N.A. Yasmanov (1985), the reconstructions of paleoclimates in Siberia in Cretaceous and Paleogene periods by A.V. Golbert (1977), history of climate of Western Siberia according to V.A. Zubakov (1990) and average annual temperatures in the Paleogene and Neogene of Western Siberia established by V.S. Volkova (2011). Paleoclimate influence on thermal history of maternal deposits was assessed based on verification of results of paleotemperature modeling of a sedimentary section in a deep well which has opened Bazhenov suite on the Pudinsky meso-uplift. It was ascertained that reconstruction of thermal history of the Bazhenov deposits without taking into account paleoclimate won't be coordinated with the data of vitrinite reflective ability and oil-and-gas content of a section.

Using the terrestrial surface when reconstructing the «local» century course of temperatures specifies significantly a density indicator of the expected oil resources. The «local» century course is recommended to be considered when assessing the hydrocarbon resources by volume and genetic method in Tomsk, Novosibirsk and Omsk areas.

Key words:

Paleoclimate, «local» century course of temperatures of a terrestrial surface, geothermal mode of Bazhenov suite, assessment of resources of hydrocarbons, southern climatic zone of Western Siberia.

REFERENCES

1. Vegener A. *Proiskhozhdenie materikov i okeanov* [Origin of continents and oceans]. Moscow, St. Petersburg, Gos. Publ., 1925. 145 p.
2. Milankovich M. *Matematicheskaya klimatologiya i astronomicheskaya teoriya kolebaniy klimata* [Mathematical climatology and astronomical theory of climate variability]. Moscow, St. Petersburg, GONTI Publ., 1939. 207 p.
3. Golovanova I.V., Salmanova R.Yu., Demezhko D.Yu. Rekonstruktsii klimata na Urale po geotermicheskim dannym [Climate reconstruction in the Urals by geothermal data]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 12, pp. 1776–1785.
4. Erofeev L.Ya., Zavidiy T.Yu. Opredelenie popravki za paleoklimaticheskii faktor dlya korrektsii rezultatov geotermicheskikh issledovaniy [Determination of correction data for paleoclimatic factor for correction geothermal research results]. *Geofizika – Geophysics*, 2010, no. 5, pp. 48–52.
5. Lopatin N.V. Kontseptsiya neftegazovykh generatsionno-akkumulyatsionnykh sistem kak integriruyushchee nachalo v obosnovanii poiskovo-razvedochnykh rabot [The concept of generation and accumulation of oil and gas systems as integrating principle in justifying exploratory works]. *Geoinformatika – Geoinformatics*, 2006, no. 3, pp. 101–120.
6. Galushkin Yu.I. *Modelirovanie osadochnykh basseynov i otsenka ikh neftegazonosnosti* [Modeling of sedimentary basins and their oil and gas evaluation]. Moscow, Nauchnyy Mir Publ., 2007. 456 p.
7. Isaev V.I., Fomin A.N. Ochagi generatsii neftey bazhenovskogo i togurskogo tipov v yuzhnoy chasti Nyurolskoy megavpadiny [Areas of generation of Bazhenov and Togur types of oil in southern part of Nyurolskoy megadepression]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 6, pp. 734–745.
8. Malyshev N.A., Obmetko V.V., Borodulin A.A. Opyt primeneniya tekhnologii basseynovogo modelirovaniya v OAO «NK-Rosneft» dlya otsenki perspektiv neftegazonosnosti akvatoriy i vybora novykh napravleniy geologorazvedochnykh rabot [Experience of application of basin modeling technology in Rosneft to evaluate the hydrocarbon potential areas and the selection of new areas of exploration work]. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2012, no. 11, pp. 14–17.
9. Lobova G.A. Vliyanie paleoklimata na geotermicheskiy rezhim bazhenovskoy svity (tsentralnaya chast Zapadnoy Sibiri) [Influence paleoclimate on geothermal regime Bazhenov Formation (central part of Western Siberia)]. *Materiali za 8-a mezhdunarodna nauchna praktichna konferentsiya, «Obrazovanieto i naukata na XXI vek». Geografiya i geologiya* [Materials 8th International Scientific and Practical Conference «Education and Science of the XXI century». Geography and geology]. Sofiya, «Byal GRAD-DG» OOD Publ., vol. 41, 2012, pp. 58–61.
10. Lobova G.A., Osipova E.N., Krinitsina K.A., Ostankova Yu.G. Vliyanie paleoklimata na geotermicheskiy rezhim i neftegeneratsionnyy potentsial bazhenovskoy svity (na shirotakh Tomskoy

- oblasti) [Paleoclimate influence on geothermal regime and oil generation potential of the Bazhenov Formation (at latitudes of Tomsk region)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 1, pp. 45–50.
11. Sharbatyan A.A. *Ekstremalnye otsenki v geotermii i geokriologii* [Extreme estimates in geothermic and cryopedology]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 123 p.
 12. Yasmanov N.A. *Rekonstruktsii klimaticheskikh usloviy mezozoya i kaynozoya Yuga SSSR* [Reconstruction of climatic conditions of the Mesozoic and Cenozoic of South USSR]. *Metody rekonstruktsii paleoklimatov* [Methods of reconstruction of palaeoclimates]. Moscow, Nauka Publ., 1985, pp. 179–184.
 13. Golbert A.B., Grigoreva K.N., Ilenok L.L., Markova L.G., Skuratenko A.B., Teslenko Yu.V. *Paleoklimaty Sibiri v melovom i paleogenovom periodakh* [Paleoclimates of Siberia in the Cretaceous and Paleogene periods]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 107 p.
 14. Zubakov V.A. *Globalnye klimaticheskie sobytiya neogena* [Global climatic events Neogene]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 223 p.
 15. Volkova V.S. *Stratigrafiya i trend paleotemperatur v paleogene i neogene Zapadnoy Sibiri (po dannym palinologii)* [Stratigraphy and paleotemperature trend in the Paleogene and Neogene of Western Siberia (according to palynology)]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 7, pp. 906–915.
 16. Kontorovich V.A. *Tektonika i neftegazonosnost mezozoyско-kaynozoysskikh otlozheniy yugo-vostochnykh rayonov Zapadnoy Sibiri* [Tectonics and oil-and-gas bearing Mesozoic-Cenozoic deposits in southern West Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2002. 253 p.
 17. Isaev V.I. *Interpretatsiya dannykh gravimetrii i geotermii pri prognozirovanii i poiskakh nefti i gaza* [Interpretation of gravity and geothermic data in forecasting and the search for oil and gas]. Tomsk, TPU Publ., 2010. 172 p.
 18. Ermakov V.I., Skorobogatov V.A. *Teplovoe pole i neftegazonosnost molodykh plit SSSR* [Thermal field and oil-and-gas young plates of the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 222 p.
 19. Burshteyn L.M., Zhidkova L.V., Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N. *Model katageneza organicheskogo veshchestva (na primere bazhenovskoy svity)* [Model of katagenesis of organic matter (by the example of the Bazhenov Formation)]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 6, pp. 1070–1078.
 20. Fomin A.N. *Katagenez organicheskogo veshchestva i neftegazonosnost mezozoysskikh i paleozoysskikh otlozheniy Zapadno-Sibirskogo megabasseyina* [Katagenesis of organic matter and oil-and-gas Mesozoic and Paleozoic deposits of the West Siberian megabasin]. Novosibirsk, INGG SO RAN Publ., 2011. 331 p.
 21. Lobova G.A., Popov S.A., Fomin A.N. *Lokalizatsiya prognoznykh resursov nefti yursko-melovykh neftegazonosnykh kompleksov Ust-Tymskoy megavpadiny* [Localization of predicted resources of oil Jurassic-Cretaceous oil and gas complexes of Ust-Tym megadepression]. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2013, no. 2, pp. 36–40.
 22. Lobova G.A. *Otsenka perspektiv neftegazonosnosti verkhneyursko-melovykh otlozheniy Ust-Tymskoy megavpadiny po rezul'tatam paleotemperaturnogo modelirovaniya* [Evaluation oil and gas potential of Upper Jurassic-Cretaceous sediments of Ust-Tym megadepression by the results of paleotemperature modeling]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, seriya: Geologiya – Bulletin of the Voronezh State University, series: Geology*, 2012, no. 2, pp. 169–178.

УДК 51-72:539.4.013:539.411.4

РАЗВИТИЕ ФОРМАЛИЗМА МЕТОДА ЧАСТИЦ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТКЛИКА ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ ПОРИСТЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Димаки Андрей Викторович,

канд. техн. наук, науч. сотр. лаборатории компьютерного конструирования материалов Института физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: dav@ispms.tsc.ru

Шилько Евгений Викторович,

д-р физ.-мат. наук, ведущ. науч. сотр. лаборатории компьютерного конструирования материалов Института физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: shilko@ispms.tsc.ru

Астафуров Сергей Владимирович,

канд. физ.-мат. наук, науч. сотр. лаборатории компьютерного конструирования материалов Института физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: svastafurov@gmail.com

Псахье Сергей Григорьевич,

член-корреспондент РАН, директор Института физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4; зав. кафедрой физики высоких технологий в машиностроении Института физики высоких технологий ТПУ Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: sp@ispms.tsc.ru

Проведено обобщение математического формализма гибридного метода частиц (метода гибридных клеточных автоматов) для численного моделирования процессов деформирования и разрушения флюидонасыщенных пористых геологических материалов на мезо- и макроскопическом масштабных уровнях. Развитый формализм учитывает возможность неупругого деформирования, дилатансии и разрушения твердофазного скелета, а также влияние порового давления на напряженное состояние скелета и перераспределение флюида в трещинно-поровом пространстве геосреды. Сформулирована связанная модель газонасыщенного геоматериала, в рамках которой механический отклик скелета описывается на основе модели пластичности геосред с неассоциированным законом течения, а перераспределение газовой фазы моделируется путем численного решения уравнений фильтрации и диффузии. Адекватность развитого формализма иллюстрируется результатами теоретического изучения влияния порового давления газа на прочность образцов угля в условиях сжатия. Показано, что степень влияния порового давления на интегральные (макроскопические) прочностные характеристики газонасыщенных материалов в значительной степени определяется соотношением параметров критерия прочности, отражающим содержание в твердофазном скелете дефектов и поврежденный высокого ранга.

Ключевые слова:

Трещиновато-пористая геологическая среда, флюид, численное моделирование, метод клеточных автоматов, метод частиц, пластичность, дилатансия, поровое давление, разрушение, прочность.

Введение

Известно, что наличие флюидов в трещинно-поровом пространстве геологических материалов оказывает существенное влияние на их механический отклик, включая разрушение. В частности, наличие адсорбированных газов может служить причиной внезапных выбросов газопылевой смеси, эпизодически происходящих в ходе выработки угольных пластов [1–6]. При этом, как свидетельствуют результаты многочисленных экспериментальных исследований, степень влияния флюида на характер деформирования и разрушения геоматериалов может быть существенно различной и определяется целым комплексом факторов. К ним относятся как

факторы, непосредственно связанные с пространственным распределением и состоянием флюида в трещинно-поровом пространстве материала (величина открытой/связанной и закрытой пористости, особенности геометрии и пространственного распределения несплошностей, адсорбция на стенках пор и т. д.), так и механические (включая реологические) характеристики самого скелета горной породы (предел упругости, коэффициент деформационного упрочнения, коэффициенты внутреннего трения и дилатансии и другие).

Корректное описание деформирования и разрушения заполненных флюидом пород невозможно без учета процессов перераспределения флюида в

трещинно-поровом пространстве материала. В свою очередь, протекание процессов перераспределения флюида взаимосвязано с деформированием твердофазного скелета, а также с изменением объема и просветности связанного трещинно-порового пространства вследствие дилатансии либо уплотнения породы. Таким образом, теоретическое описание механического отклика флюидонасыщенных трещиновато-пористых сред должно осуществляться в связанной постановке, учитывающей взаимовлияние процессов деформирования твердофазного скелета (приводящего к изменению трещинно-порового объема) и пространственного перераспределения флюида вследствие неоднородного изменения порового давления.

В связи со сказанным актуальной задачей механики деформируемого твердого тела является развитие методов численного моделирования процессов деформирования и разрушения флюидонасыщенных геоматериалов и геосред на различных масштабных уровнях. Перспективным численным методом, созданным для решения задач такого рода, является «гибридный» метод клеточных автоматов (ГКА). Метод ГКА объединяет формализмы метода частиц в формулировке дискретных элементов (МДЭ) для описания механического отклика твердофазного скелета и метода классических клеточных автоматов для моделирования процессов фильтрации и диффузии флюида в трещинно-поровом пространстве [7]. Отметим, что преимуществом использования метода частиц при решении связанных задач является возможность непосредственного моделирования явлений разрушения, в том числе множественного, сопровождающегося эффектами перемешивания и локализованного массопереноса.

В настоящей работе предложена и реализована в рамках метода ГКА связанная модель газонасыщенного трещиновато-пористого материала. Данная модель эффективно учитывает взаимовлияние процессов деградации твердофазного скелета при нагружении и перераспределения флюида. Показана адекватность развитого формализма вычислительного метода ГКА на примере изучения влияния порового давления газа на прочность газонасыщенных углей.

Формализм метода гибридных клеточных автоматов для моделирования флюидонасыщенных трещиновато-пористых материалов

Основные положения метода

В рамках метода ГКА исследуемая среда рассматривается как суперпозиция двух взаимопроникающих слоев (рис. 1, а), один из которых представлен ансамблем взаимодействующих подвижных клеточных автоматов (ПКА) [8, 9], а другой – сеткой классических клеточных автоматов (ККА) [10]. В такой комбинированной схеме ансамбль подвижных клеточных автоматов моделирует твердофазный скелет, а сетка классических клеточных автоматов используется для моделирования процессов перераспределения флюида в объеме вмещающего твердого тела (иными словами, в объеме подвижных клеточных автоматов) [7].

В рамках метода ГКА шаг интегрирования уравнений динамики моделируемой многофазной системы состоит из двух этапов. Первый из них условно называется «механическим» и представляет собой шаг интегрирования уравнений движения подвижных клеточных автоматов. На этом этапе моделируются процессы деформирования и разрушения материала твердого каркаса под действием механических нагрузок. Второй этап связан с описанием эволюции (переноса) газовой/жидкой фаз в трещинно-поровом пространстве подвижных клеточных автоматов и окружающей моделируемое твердое тело среде (эта среда также может быть заполнена жидкостью или газом). Данные процессы моделируются на сетке классических клеточных автоматов. На основе рассчитанных значений концентраций флюида в трещинно-поровом пространстве подвижных клеточных автоматов вычисляется вклад порового давления в величину локальных внутренних напряжений в твердофазном каркасе подвижных клеточных автоматов. Таким образом, метод ГКА позволяет связать решения динамических задач механики твердого тела и газа или жидкости и, тем самым, описывать поведение многофазной гетерогенной среды. Отметим, что точность решения такой связанной задачи зависит от соотношения

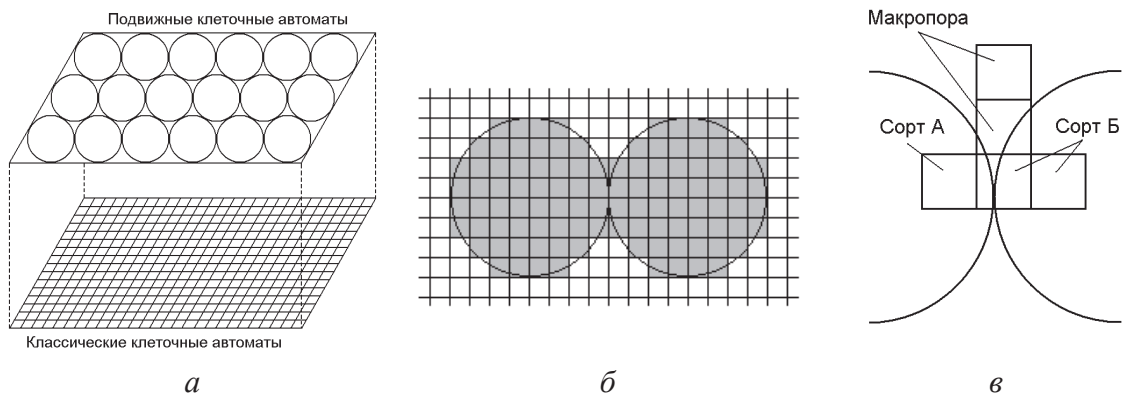


Рис. 1. а) слои подвижных и классических клеточных автоматов; б) проекция пары подвижных клеточных автоматов на сетку классических клеточных автоматов; в) определение сорта классического клеточного автомата

между размерами классического и подвижного автоматов (с его уменьшением повышается точность «проецирования» свойств со слоя ПКА на слой ККА и обратно).

Формализм метода ГКА обладает достаточно высокой «гибкостью», позволяющей моделировать отклик многофазных систем на различных структурных уровнях и реализовывать различные (в том числе многомасштабные) реологические модели твердофазного скелета и модели динамики флюидов. Ниже предлагается реализация в рамках метода ГКА связанной модели трещиновато-пористых газонасыщенных геосред на мезо- и макроскопическом масштабах. В ее рамках отклик упругохрупкого твердофазного скелета описывается с использованием модели пластичности Николаевского, перераспределение газовой фазы моделируется путем численного решения уравнений фильтрации и диффузии газа.

Модель механического отклика
твердофазного скелета

Метод подвижных клеточных автоматов, использующийся для моделирования деформирования и разрушения твердофазного каркаса, является представителем метода частиц в формулировке дискретных элементов [8, 9]. Основным преимуществом метода ПКА в сравнении с традиционными реализациями МДЭ [11, 12] является обобщенная (многочастичная) форма записи соотношений для сил центрального взаимодействия в парах элементов, аналогичная записи потенциала погруженного атома. Как показано в работе [9], это позволяет корректно реализовывать различные реологические модели твердых тел.

Для моделирования отклика трещиновато-пористых геоматериалов в рамках метода ПКА реализована модель пластичности горных пород с неассоциированным законом течения и критерием Мизеса–Шлейхера достижения предела упругости (модель Николаевского) [13, 14]. Выбор данной модели связан с тем, что она адекватно описывает отклик геоматериалов на различных масштабных уровнях с учетом вкладов «нижележащих» структурных масштабов. Особенностью модели Николаевского является постулируемая линейная связь между скоростями объемной и сдвиговой составляющих пластической деформации с коэффициентом пропорциональности Λ , называемым коэффициентом дилатансии.

Адаптация модели Николаевского к методу частиц осуществлена с использованием алгоритма Уилкинса [15], в рамках которого решение упруго-пластической задачи осуществляется путем решения упругой задачи и последующей корректировки потенциальных сил взаимодействия частиц с соблюдением необходимых требований модели Николаевского, предъявляемых к величине локального давления и критерия Мизеса–Шлейхера.

Решение упругой задачи на ансамбле частиц сводится к определению приращений центральной

и тангенциальной компонент силы упругого отклика подвижного клеточного автомата i на воздействие со стороны соседнего автомата j . Соответствующие выражения записываются на основе обобщенного закона Гука в гипотетической форме [9]:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_{i(j)} = \Delta F_{i(j)}^{centr} / S_{ij} = \\ = 2G_i \left(\Delta\varepsilon_{i(j)} - \frac{\Delta P_i^{gas}}{K_i} \right) + \left(1 - \frac{2G_i}{K_i} \right) \Delta\bar{\sigma}_i^{mean}, \\ \Delta\tau_{i(j)} = \Delta F_{i(j)}^{tang} / S_{ij} = 2G_i \Delta\gamma_{i(j)} \end{cases} \quad (1)$$

где символ Δ означает приращение величины соответствующего параметра за шаг по времени Δt численной схемы интегрирования; $\sigma_{i(j)}$ и $\tau_{i(j)}$ – удельные значения центральной ($F_{i(j)}^{centr}$) и тангенциальной ($F_{i(j)}^{tang}$) составляющих потенциальной силы реакции подвижного клеточного автомата i на воздействие со стороны соседа j ; S_{ij} – площадь поверхности контакта пары; G_i и K_i – модули сдвига и всестороннего сжатия материала автомата i ; $\Delta\varepsilon_{i(j)}$ и $\Delta\gamma_{i(j)}$ – приращения нормальной и сдвиговой деформации автомата i в паре $i-j$; $\bar{\sigma}_i^{mean}$ – среднее напряжение в объеме автомата i ; P_i^{gas} – вклад порового давления флюида в величину среднего напряжения в объеме подвижного клеточного автомата. Среднее напряжение $\bar{\sigma}_i^{mean}$ вычисляется с использованием соотношения Лява, связывающего компоненты тензора усредненных напряжений ($\bar{\sigma}_{\alpha\beta}$) в некотором замкнутом объеме с силами, действующими на поверхность данного объема [9, 12].

Известно, что напряженное состояние твердофазного каркаса является сложным и обусловлено не только величиной удельного объема несплошностей, но и особенностями их геометрии и пространственного распределения [16, 17]. В случае отсутствия ярко выраженной геометрии и ориентации (текстуры) трещинно-порового пространства адекватным является приближение, в соответствии с которым на мезо- или макроскопическом масштабном уровне учитывается только вклад давления газов в величину гидростатического напряжения в скелете (гидростатическое растяжение). Это приближение и использовано в соотношении (1).

После решения упругой задачи для автомата i проверяется условие достижения предельного состояния (критерий Мизеса–Шлейхера), учитывающее вклад порового давления флюида:

$$\Phi_i = \beta_i (\bar{\sigma}_i^{mean} + P_i^{gas}) + \bar{\sigma}_i^{int} / \sqrt{3} > Y_i, \quad (2)$$

где Y_i – предел упругости материала автомата i при сдвиге, β_i – коэффициент внутреннего трения, $\bar{\sigma}_i^{int}$ – интенсивность усредненных напряжений в объеме автомата i .

Приведение сил межчастичного взаимодействия к предельной поверхности (релаксация) осуществляется в соответствии с выражениями, полученными в работе [9]:

$$\begin{cases} \sigma'_{i(j)} = (\sigma_{i(j)} - \bar{\sigma}_i^{mean}) M_i + (\bar{\sigma}_i^{mean} - N_i) \\ \tau'_{i(j)} = \tau_{i(j)} M_i \end{cases},$$

где $(\sigma'_{ij}, \tau'_{ij})$ – приведенные значения удельных сил реакции автомата; $M_i = 1 - (\sqrt{3}/\bar{\sigma}_i^{\text{int}})(3G_i(\Phi_i - Y_i)/(K_i\Lambda_i\beta_i + 3G_i))$ – коэффициент приведения девиаторов напряжений; $N_i = K_i\Lambda_i(\Phi_i - Y_i)/(K_i\Lambda_i\beta_i + G_i)$ – поправка к величине среднего напряжения, вычисленного в упругом приближении; Λ_i – коэффициент дилатансии материала автомата i .

Развитый подход к построению многочастичного взаимодействия дает возможность использовать многопараметрические критерии разрушения (Кулона–Мора, Друккера–Прагера и т. д.) в качестве критерия разрыва связи (потери сцепления) в парах взаимодействующих элементов [9]. В развитой модели применяется модифицированный критерий разрушения Друккера–Прагера, учитывающий вклад локального порового давления флюида:

$$\sigma_{DP} = 0,5(a+1)\sigma_{\text{int}} + 1,5(a-1)(\sigma_{\text{mean}} + P_{\text{gas}}) > \sigma_c, \quad (3)$$

где σ_c – пороговое значение для рассматриваемой пары частиц (величина, характеризующая прочность химической связи), $a = \sigma_c/\sigma_i$ – отношение прочностей сцепления пары при одноосном сжатии (σ_c) и растяжении (σ_i). Отметим, что, хотя критерии наступления неупругой деформации (2) и разрушения (3) имеют одинаковую структурную форму, смысл коэффициентов при слагаемом σ_{mean} в них совершенно различный. Так, величина коэффициента β определяет степень влияния давления на зарождение и развитие сети микроскопических повреждений и трещин в объеме материала. В то же время коэффициент $1,5(a-1)$ определяет влияние давления на условие локализованного объединения отдельных микроповреждений в единый мезо- или макроразрыв. Сказанное свидетельствует о том, что значения этих двух коэффициентов не обязательно являются согласованными, поскольку роль локального давления в эволюции повреждения, как правило, существенно возрастает с ростом пространственного масштаба повреждения.

Фильтрационно-диффузионная модель переноса газовой фазы

При моделировании процессов переноса газов в твердофазном скелете необходимо учитывать, что в общем случае такие системы представляют собой среду с многомасштабной структурой. В порядке убывания размеров можно выделить следующие структурные уровни: среда в целом как сплошное тело (макроуровень); фрагменты и блоки; открытые поры и фильтрационные каналы различной протяженности и диаметров; повреждения и микротрещины; закрытые поры; отдельные кристаллиты [18–20]. Очевидно, что при описании эволюции фрагментов контрастной среды мезо- и макроскопического масштаба (то есть, масштабного уровня, характерный размер которого на порядки величины превышает среднее расстояние между порами и каналами) характеристики трещинно-поровой структуры более низких масштабов должны учитываться интегрально. Среди них прин-

ципально важными являются следующие: 1) величина открытой пористости (или фильтрационного объема), образованной сообщающейся системой пор, каналов и трещин, имеющих выход на внешнюю поверхность; 2) величина закрытой пористости, представленной ансамблем изолированных микропор и микроповреждений, не имеющих связи с фильтрационным объемом материала.

Математический формализм, применяемый для описания переноса газа в такой контрастной среде, определяется наличием открытой/закрытой пористости и состоянием заключенного в объеме материала газа. В настоящей модели для каждого компонента смеси газов используются приближения идеального газа и изотермических условий ($T = \text{const}$) [7]. Перенос газовой смеси в материале описывается системой уравнений, включающей уравнение фильтрации [20, 21]:

$$\gamma_{\text{open}} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\mu} P \frac{\partial P}{\partial x} \right), \quad (4)$$

и уравнение диффузии газа из закрытых пор (и твердофазного каркаса) в фильтрационный объем (и обратно) [20]:

$$\gamma_{\text{closed}} \frac{\partial \rho}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2}, \quad (5)$$

где ρ – плотность газа, k – коэффициент проницаемости пористого каркаса, μ – динамическая вязкость газа, P – парциальное давление газа в трещинно-поровом пространстве, γ_{open} – открытая пористость, γ_{closed} – закрытая пористость, D_{eff} – эффективный коэффициент диффузии, зависящий от коэффициента диффузии материала твердого каркаса, параметров пористости, среднего размера монолитных блоков среды, а также от растворимости газа в твердофазном каркасе [20, 22].

Связь между концентрацией газа в твердофазном каркасе (в том числе в закрытых микропорах) и его плотностью в фильтрационном объеме устанавливается законом Генри, справедливым в широком интервале значений гидростатического давления [23]:

$$\gamma_{\text{closed}} \rho = \nu P, \quad \nu \ll 1. \quad (6)$$

где ν – растворимость газа в материале твердого каркаса. В качестве уравнения состояния газа в модели используется уравнение Менделеева–Клапейрона:

$$PV = NR_{\text{gas}} T, \quad (7)$$

где N – количество молей газа; R_{gas} – универсальная газовая постоянная, T – температура газа (в рамках используемого приближения температура каркаса и газа полагаются постоянными и равными между собой). Отметим, что в общем случае давление газа в фильтрационном объеме и закрытых (изолированных) порах и трещинах является различным.

Поскольку компоненты газовой смеси (отдельные газы) рассматриваются как идеальные, их

парциальные давления могут рассчитываться независимо. Коэффициент проницаемости твердого каркаса удовлетворительно описывается формулой [20]:

$$k = \gamma d^2,$$

где d – характерный диаметр каналов просачивания.

Уравнения фильтрации (4) и диффузии (5) решаются на сетке классических клеточных автоматов с использованием неявной разностной схемы расщепления по пространственным переменным с соответствующими начальными и граничными условиями, конкретный вид которых определяются физической постановкой решаемой задачи. Результатом их решения на каждом временном шаге являются новые значения давления газа в классическом клеточном автомате.

В случае присутствия в моделируемой системе смеси нескольких газов уравнения (4)–(7) решаются независимо для каждого компонента. Полное давление смеси газов в фильтрационном объеме или закрытых порах классического клеточного автомата представляет собой сумму парциальных давлений.

Следует отметить, что в рамках описанной модели некоторые свойства газов учтены лишь приближенно. В частности, применяется уравнение состояния идеального газа (в порах и трещинах наноскопического масштаба оно может существенно отличаться от идеального и характеризуется сильным влиянием адсорбированных на поверхности пор молекулярных слоев газа и наличием квантовых эффектов [19, 24]). Кроме того, не учитывается возможность физико-химического взаимодействия различных компонентов в многокомпонентной газовой смеси (в этом случае используемое приближение независимого определения характеристик компонентов является неточным). Тем не менее, потенциал развитого подхода обеспечивает широкие возможности реализации в рамках метода ГКА различных уравнений состояния флюидов и моделей переноса многокомпонентных смесей газов и жидкостей в проницаемых трещиновато-пористых системах [25].

Взаимосвязь моделей вмещающего
твердофазного скелета и газовой фазы

Математические модели механического отклика твердофазного скелета и заполняющего его несплошности флюида образуют взаимосвязанную систему, моделируемую посредством наложения двух слоев клеточных автоматов (ансамбля ПКА и неподвижной сетки ККА). Влияние слоя классических клеточных автоматов на ансамбль частиц (подвижных автоматов) осуществляется посредством вклада P_i^{gas} в соотношения (1), (2) и (3). В настоящей модели вычисление давления газа осуществляется в приближении линейной зависимости от величины удельного объема фильтрационного и изолированного трещинно-порового пространства:

$$P_i^{gas} = P_i^{closed} \gamma_i^{closed} + P_i^{open} \gamma_i^{open}. \quad (8)$$

Здесь γ_i^{open} и γ_i^{closed} – фильтрационная и закрытая пористость в объеме подвижного клеточного автомата i , P_i^{open} и P_i^{closed} – полное давление газовых смесей, содержащихся в фильтрационном объеме и изолированных порах/микротрещинах подвижного автомата. Давления P_i^{open} и P_i^{closed} определяются усреднением соответствующих значений по классическим клеточным автоматам, относящимся к подвижному клеточному автомату i (рис. 1, б). Выражение (8) следует рассматривать как первое приближение, предполагающее однородное распределение пор, трещин и фильтрационных каналов в объеме подвижного клеточного автомата и не учитывающее особенности их геометрии и пространственной ориентации. Кроме того, развитая модель не учитывает влияния молекул газа, абсорбированных в кристаллической решетке, на величину упругой энергии твердофазного каркаса. Тем не менее, как показано в [23], такое приближение является вполне допустимым.

Отметим также, что наличие газов в окружающем моделируемое твердое тело пространстве (в «макропорах», рис. 1, в) приводит к возникновению дополнительных сил, действующих на поверхность твердого тела и вызывающих внутренние напряжения в скелете. В рассматриваемой модели влияние давления «внешних» газов на напряженное состояние подвижных клеточных автоматов, моделирующих поверхностный слой твердофазного каркаса, вычисляется в соответствии с ранее полученными соотношениями [7]. Полагается, что давление окружающего газа на свободную (не занятую соседями) часть поверхности подвижного клеточного автомата i дает вклад в полную силу, приложенную к центру масс автомата, а также приводит к изменению величины компонентов усредненных напряжений $\bar{\sigma}_i^{\alpha\beta}$.

Изучение влияния порового давления газа на распределение напряжений и характер разрушения образцов угля

Корректность развитого формализма метода гибридных клеточных автоматов подтверждена тестовыми расчетами фильтрации и диффузии газов в газоносных геоматериалах [7], а также моделированием механического отклика таких систем при механическом нагружении. В качестве примера ниже приведены результаты моделирования одноосного нагружения образца молодого бурого угля (лигнита) [26], трещинно-поровое пространство которого заполнено газом (использовался режим нагружения с постоянной скоростью $V=0,02$ м/с, рис. 2, а). Давление газа в окружающем образец пространстве полагалось равным 0 бар. Образец помещен между пуансонами, нижний из которых оставался неподвижным, а верхний перемещался вниз с постоянной скоростью V . Механические свойства материала образца соответствовали высококачественной литотипной ка-

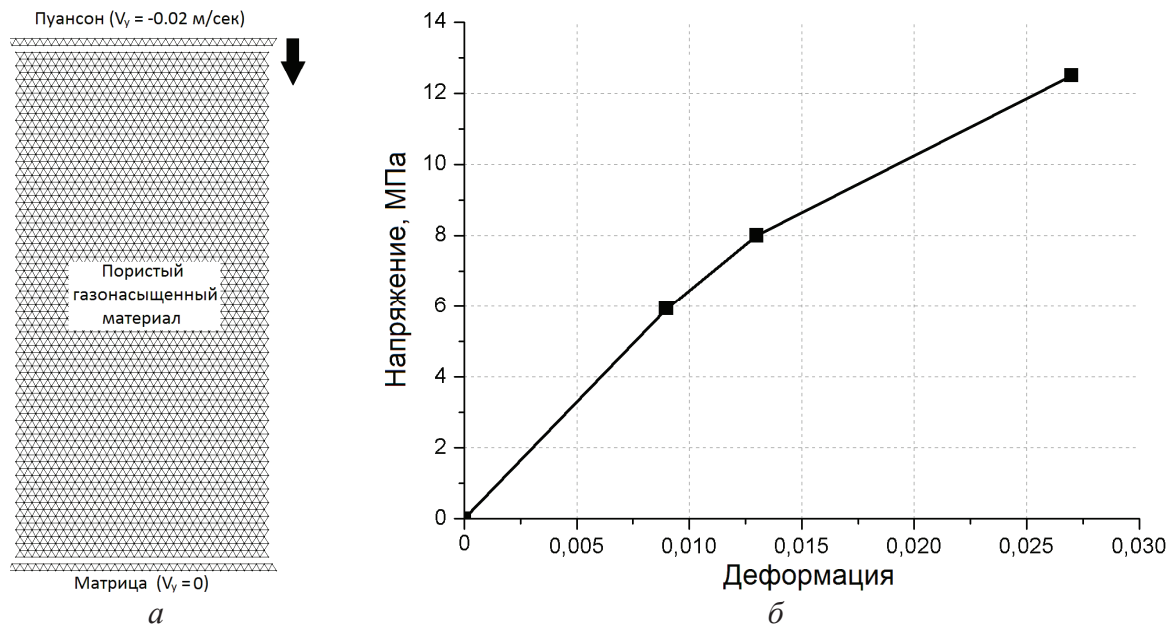


Рис. 2. Схема моделируемого образца (а), линейризованная диаграмма одноосного сжатия дробного детрита (б)

теории лигнита (дробному детриту), упрощенная (линеаризованная) диаграмма одноосного сжатия которого приведена на рис. 2, б. Коэффициент дилатансии материала полагался равным $\Lambda=0,173$, коэффициент внутреннего трения $\beta=0,49$. Макроструктура моделируемого образца предполагалась однородной, макроскопические поры и включения отсутствовали, что является типичным для дробного детрита. Параметры пористости лигнита (таблица) были получены на основании экспериментальных данных по сорбционным свойствам лигнита, полученных Й. Пездичем и Я. Жулой на образцах из Веленской угольной шахты (Веленье, Словения) [27, 28].

Таблица. Оценки параметров пористости и сорбционных свойств лигнита (Веленская угольная шахта, Веленье, Словения)

Открытая пористость	0,042
Коэффициент диффузии, см ² /с	$3,4 \cdot 10^{-7}$
Закрытая пористость	0,55
Коэффициент растворимости	0,05
Средний диаметр фильтрационного канала, м	$2,5 \cdot 10^{-9}$
Средний размер «монолитного» блока, м	$1 \cdot 10^{-4}$

Результаты моделирования показали, что в условиях одноосного сжатия образцы дробного детрита демонстрируют хрупкий отклик, хорошо согласующийся с поведением реальных образцов цилиндрической формы. Разрушение образцов происходит путем формирования одной или нескольких диагональных трещин. Расчеты, проводимые при различных значениях порового давления газа в интервале от 0 до 5,5 бар, показали, что прочность образцов снижается с ростом порового давления по линейному закону (рис. 3, а). Это соответствует экспериментальным данным для различ-

ных углей и свидетельствует об адекватной формулировке критерия разрушения (3) и корректной реализации связанной модели газонасыщенных геоматериалов.

Хорошо известно, что хрупкие материалы, в том числе большинство горных пород, характеризуются низкими значениями прочности на растяжение (σ_t) при достаточно высоких значениях прочности на сжатие (σ_c). Отношение $\sigma_c/\sigma_t=a$ может достигать 10 и более и определяется особенностями гетерогенной структуры материала, в том числе иерархией исходных повреждений. Так, с увеличением концентрации «крупных» дефектов и повреждений (много больших характерных размеров пор и каналов фильтрационного объема) величина прочности материала на растяжение снижается намного быстрее величины прочности на сжатие. Это связано с различиями в функционировании повреждений плоскостного типа в условиях растяжения (разрыв) и сжатия (сухое/вязкое трение сжатых поверхностей повреждения). Отметим, что наличие повреждений достаточно высокого ранга может приводить к кратному уменьшению величины σ_t , даже если их концентрация (и вклад в фильтрационную пористость) незначительна. В связи со сказанным актуальным представляется анализ степени влияния порового давления газа на прочность трещинно-пористых геоматериалов, характеризующихся различным отношением $\sigma_c/\sigma_t=a$. В настоящей работе такое теоретическое исследование проведено для образцов дробного детрита (рис. 2, а) при одноосном сжатии.

Рассматривались образцы дробного детрита с различным соотношением параметров σ_c и σ_t критерия разрушения Друккера–Прагера (3). При этом значение σ_c в проводимых расчетах полагалось постоянным (12,5 МПа). Значение второго па-

параметра (σ_i) варьировалось в пределах от 4 до 10 МПа. На рис. 3, а приведены зависимости прочностей моделируемых образцов с различными значениями σ_i от величины вклада порового давления газа в величину среднего напряжения в твердофазном скелете (P_{gas}), определяемого выражением (8). Приведенные кривые имеют вид, близкий к линейному. При этом влияние внутривещного газа на прочность образца уменьшается с ростом отношения σ_c/σ_i и в пределе стремится к нулю. Это проявляется, в частности, в нелинейном характере снижения тангенса угла наклона кривых, приведенных на рис. 3, а (рис. 3, б).

Результаты численного моделирования, представленные на рис. 3, б, могут быть верифицированы аналитической оценкой. Применяемый в рамках изложенной модели модифицированный критерий Друккера–Прагера (3) может быть переписан в следующей форме:

$$\sigma_{DP} = 0,5(a+1)\sigma_{int} + 1,5(a-1)(K\varepsilon_{mean} + P_{gas}). \quad (9)$$

В рамках используемого приближения поровое давление газа не оказывает интегрального влияния на касательные напряжения во вмещающем твердом теле. Поэтому, пренебрегая влиянием объемной деформации на величину P_{gas} , можно записать:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{DP}}{dP_{gas}} &= 1,5(a-1) \frac{d}{dP_{gas}} (K\varepsilon_{kk} + P_{gas}) = \\ &= 1,5(a-1) = 1,5 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_i} - 1 \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Выражение (10) является аналитической оценкой скорости снижения прочности образцов с увеличением порового давления газа. Аналитическая

зависимость $\frac{d\sigma_{DP}}{dP_{gas}}(a)$ приведена на рис. 3, б вме-

сте с результатами численного моделирования. Можно видеть как качественное совпадение характера построенных зависимостей, так и хорошее количественное согласие.

Различие между аналитической зависимостью

$$\frac{d\sigma_{DP}}{dP_{gas}}(a) \text{ и результатами численного моделирования}$$

составляет менее 20 % и приблизительно одинаково во всем рассмотренном интервале прочностей. Данное различие обусловлено главным образом эффектами локализации неупругой деформации и дилатансионного расширения в образцах моделируемого газонасыщенного материала при сжатии. Действительно, аналогичные расчеты, проведенные на образцах с упругохрупкими механическими характеристиками (линейно-упругий отклик вплоть до разрушения) и теми же значениями прочностных параметров, показали более чем двукратное уменьшение различия между аналитическими и численными оценками зависимости

$$\frac{d\sigma_{DP}}{dP_{gas}}(a).$$

Заключение

В работе проведено развитие формализма метода частиц для моделирования связанных процессов деформации и разрушения трещиновато-пористых материалов и перераспределения флюидов в их трещинно-поровом пространстве. Механический отклик твердофазного скелета описывается на основе модели пластичности горных пород с неассоциированным законом течения и критерием Мизеса–Шлейхера достижения предела упругости (модель Николаевского). Перенос газа (или смеси газов) в трещинно-поровом пространстве материала описывается уравнениями фильтрации и диффузии. Взаимосвязь двух систем уравнений осу-

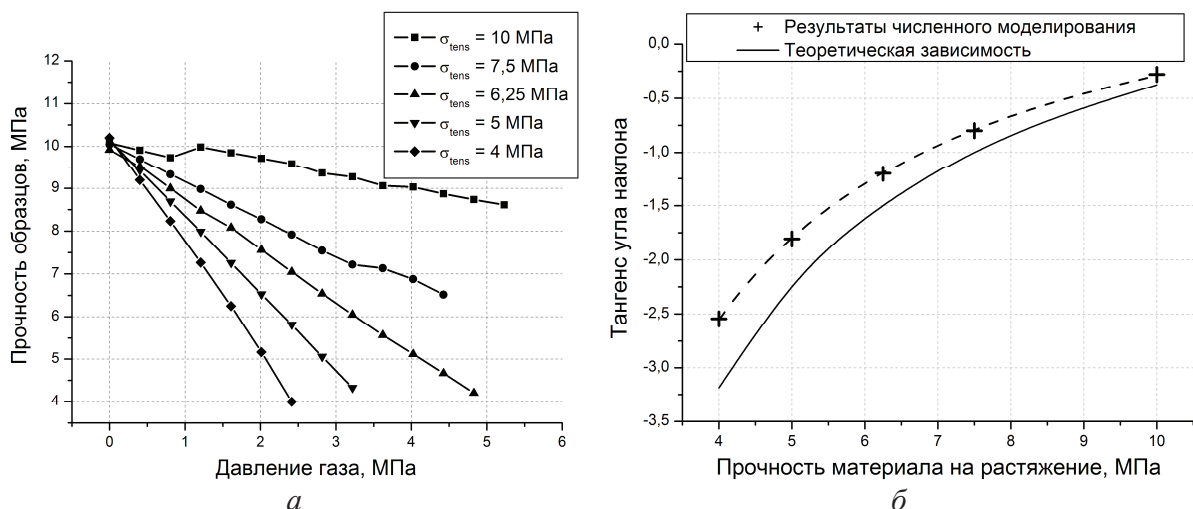


Рис. 3. Зависимость прочности образца модельного газонасыщенного материала от давления газа в порах при различных значениях прочности материала на растяжение (а), зависимость угла наклона кривых (рис. а) от значения прочности материала на растяжение (б)

ществляется посредством учета влияния порового давления газов на пределы упругости и прочности твердофазного скелета. Предложенная связанная модель реализована в рамках «гибридного» метода клеточных автоматов, объединяющего вычислительные методы частиц и классических клеточных автоматов.

Адекватность развитого формализма продемонстрирована на примере моделирования одноосного сжатия газонасыщенных образцов бурого угля. Показано, что с увеличением давления газа в поровом пространстве прочность образцов при одноосном сжатии линейно снижается. Вид и наклон данной зависимости соответствуют экспериментальным данным и теоретическим представлениям о механизмах влияния порового давления газа на прочностные свойства геоматериалов. Полученные результаты подтвердили применимость

метода ГКА для изучения механического отклика (включая разрушение) газоносных геоматериалов в сложных условиях нагружения.

Формализм метода гибридных клеточных автоматов является достаточно гибким и обеспечивает возможность реализации в его рамках различных связанных моделей контрастных сред, содержащих компоненты в твердой, жидкой и газообразной фазах. Это дает потенциальную возможность исследовать большой комплекс проблем, связанных с влиянием флюидов на состояние геоматериалов и участков геосреды (например, горного массива в окрестности выработки или разломных зон) вблизи критического состояния.

Работа выполнена в рамках проекта III.23.1.4 Программы фундаментальных исследований СО РАН (2013–2016 гг.) и при поддержке проекта № 4 Программы Президиума РАН № 25.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. – М.: Наука, 1983. – 280 с.
2. Полевщиков Г.Я. Динамические газопроявления при проведении подготовительных и вскрывающих выработок в угольных шахтах. – Кемерово: Институт угля и углехимии СО РАН, 2003. – 317 с.
3. Flores R.M. Coalbed methane: from hazard to resource // Int. J. Coal Geol. – 1998. – V. 35. – P. 3–26.
4. Beamish B.B., Crosdale P.J. Instantaneous outbursts in underground coal mines: an overview and association with coal type // Int. J. Coal Geol. – 1998. – V. 35. – P. 27–55.
5. Cao Y., He D., Glick D.C. Coal and gas outbursts in footwalls of reverse faults // Int. J. Coal Geol. – 2001. – V. 48. – P. 47–63.
6. Larsen J.W. The effects of dissolved CO₂ on coal structure and properties // Int. J. Coal Geol. – 2004. – V. 57. – P. 63–70.
7. Псахье С.Г., Шилько Е.В., Смолин А.Ю. и др. Развитие подхода к моделированию деформирования и разрушения иерархически организованных гетерогенных, в том числе контрастных, сред // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14. – № 3. – С. 27–54.
8. Псахье С.Г., Хори Я., Коростелев С.Ю. и др. Метод подвижных клеточных автоматов как инструмент для моделирования в рамках физической мезомеханики // Известия вузов. Физика. – 1995. – Т. 38. – № 11. – С. 58–69.
9. Psakhie S., Shilko E., Smolin A. et al. Development of a formalism of movable cellular automaton method for numerical modeling of fracture of heterogeneous elastic-plastic materials // Fracture and Structural Integrity. – 2013. – V. 24. – P. 59–91.
10. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
11. Jing L., Stephansson O. Fundamentals of discrete element method for rock engineering: theory and applications. – London: Elsevier, 2007. – 562 p.
12. Potyondy D.O., Cundall P.A. A bonded-particle model for rock // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2004. – V. 41. – P. 1329–1364.
13. Гарагаш И.А., Николаевский В.Н. Неассоциированные законы течения и локализации пластической деформации // Успехи механики. – 1989. – Т. 12. – № 1. – С. 131–183.
14. Стефанов Ю.П. Локализация деформации и разрушение в геоматериалах. Численное моделирование // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 107–118.
15. Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. – Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. – 246 p.
16. Kushch V.I., Shmegeera S.V., Sevostianov I. SIF statistics in micro cracked solid: effect of crack density, orientation and clustering // Int. J. Eng. Sci. – 2009. – V. 47. – P. 192–208.
17. Черных В.А. Модель изменения проницаемости неоднородной горной породы в процессе деформации // ФТИРПИ. – 1990. – № 1. – С. 126–128.
18. Cushman J.H. The physics of fluids in hierarchical porous media: angstroms to miles. – Heidelberg: Springer, 1997. – 469 p.
19. Хавкин А.Я. Наноявления и нанотехнологии в добыче нефти и газа. – М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. – 692 с.
20. Алексеев А.Д., Василенко Т.А., Гуменик К.В. и др. Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта // ЖТФ. – 2007. – Т. 77. – № 4. – С. 65–74.
21. Христианович С.А. Об основах теории фильтрации // ФТИРПИ. – 1989. – № 5. – С. 3–18.
22. Эттингер И.Л., Ковалева И.Б. Напряжения набухания и свободная энергия в системе газ–уголь // ДАН СССР. – 1979. – Т. 244. – № 3. – С. 659–663.
23. Алексеев А.Д., Синолицкий В.В. Теория абсорбции газа пористыми веществами // Физика и техника высоких давлений. – 1983. – Вып. 12. – С. 103–106.
24. Гриняев Ю.В., Псахье С.Г. О фазовых переходах газа в 2D напорно-фильтрационной модели // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16. – № 4. – С. 105–108.
25. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. II. – М.: Наука, 1987. – 360 с.
26. Markic M., Sachsenhofer R.F. Petrographic composition and depositional environments of the Pliocene Velenje lignite seam (Slovenia) // Int. J. Coal Geol. – 1997. – V. 33. – P. 229–254.
27. Pezdic J., Markic M., Letic M. et al. Laboratory simulation of adsorption-desorption processes on different lignite lithotypes from the Velenje lignite mine // RMZ – Materials and Geoenvironment. – 1999. – V. 46. – № 3. – P. 555–568.
28. Zula J., Pezdic J., Zavsek S. et al. Adsorption capacity of the Velenje lignite: methodology and equipment // RMZ – Materials and Geoenvironment. – 2011. – V. 58. – № 2. – P. 193–216.

Поступила 19.11.2013 г.

UDC 51-72:539.4.013:539.411.4

DEVELOPMENT OF PARTICLE METHOD FORMALISM FOR NUMERICAL MODELING OF THE RESPONSE OF FLUID-SATURATED POROUS GEOLOGICAL MATERIALS

Andrey V. Dimaki,

Cand. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Science,
Siberian Branch of Russian Academy of Science,
Russia, 634021, Tomsk, Akademicheskii avenue, 2/4. E-mail: dav@ispms.tsc.ru

Evgeny V. Shilko,

Dr. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Science,
Siberian Branch of Russian Academy of Science, Russia, 634021, Tomsk,
Akademicheskii avenue, 2/4. E-mail: shilko@ispms.tsc.ru

Sergey V. Astafurov,

Cand. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Science,
Siberian Branch of Russian Academy of Science, Russia, 634021, Tomsk,
Akademicheskii avenue, 2/4. E-mail: svastafurov@gmail.com

Sergey G. Psakhie,

Dr. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Science,
Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: sp@ispms.tsc.ru

The authors have generalized the mathematical formalism of hybrid particle method (method of hybrid cellular automata) for the numerical simulation of deformation and fracture of fluid-saturated porous geological materials at the meso- and macroscopic scales. The formalism allows taking into account inelastic deformation, dilatancy and fracture of solid skeleton as well as the influence of pore pressure on skeleton stress state and the fluid redistribution in pore space of the fractured geological medium. In the framework of the model the mechanical response of the skeleton is described within the model of plasticity of geological medium with unassociated flow law. The redistribution of the gas phase is simulated by numerical solution of equations of filtration and diffusion. The adequacy of the formalism is illustrated with the results of the theoretical study of gas pore pressure influence on coal sample strength under uniaxial compression. It is shown that the degree of pore pressure influence on macroscopic strength of gas-saturated material is strongly determined by the ratio of parameters of strength criterion, which reflects the content of defects and damages of high rank in the solid skeleton.

Key words:

Fractured porous geological medium, fluid, numerical modeling, cellular automaton method, particle method, plasticity, dilatancy, pore pressure, fracture, strength.

REFERENCES

1. Petukhov I.M., Linkov A.M. *Mekhanika gornykh udarov i vybrosov* [Mechanics of Rockbursts and Outbursts]. Moscow, Nedra Publ. House, 1983. 280 p.
2. Polevshchikov G.Ya. *Dinamicheskie gazoproyavleniya pri provedenii podgotovitelnykh i vskryvayushchikh vyrobotok v ugolnykh shakhtah* [Dynamic gas effects in the preparatory and revealing workings in coal mines]. Kemerovo, Institute of Coal and Coal Chemistry SB RAS, 2003. 317 p.
3. Flores R.M. Coalbed methane: from hazard to resource. *Int. J. Coal Geol.*, 1998, vol. 35, pp. 3–26.
4. Beamish B.B., Crosdale P.J. Instantaneous outbursts in underground coal mines: an overview and association with coal type. *Int. J. Coal Geol.*, 1998, vol. 35, pp. 27–55.
5. Cao Y., He D., Glick D.C. Coal and gas outbursts in footwalls of reverse faults. *Int. J. Coal Geol.*, 2001, vol. 48, pp. 47–63.
6. Larsen J.W. The effects of dissolved CO₂ on coal structure and properties. *Int. J. Coal Geol.*, 2004, vol. 57, pp. 63–70.
7. Psakhie S.G., Shilko E.V., Smolin A.Yu. Razvitie podkhoda k modelirovaniyu deformirovaniya i razrusheniya ierarkhicheskikh organizovannykh geterogennykh v tom chisel kontrastnykh sred [Approach to simulation of deformation and fracture of hierarchically organized heterogeneous media, including contrast media]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2011, vol. 14, no. 5–6, pp. 224–248.
8. Psakhie S.G., Horie Y., Korostelev S.Yu. Metod podvizhnykh kletochnykh avtomatov kak instrument dlya modelirovaniya v ramkakh fizicheskoy mezomekhaniki [Method of movable cellular automata as a tool for simulation within the framework of mesomechanics]. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 1995, vol. 38, no. 11, pp. 1157–1168.
9. Psakhie S., Shilko E., Smolin A. Development of a formalism of movable cellular automaton method for numerical modeling of fracture of heterogeneous elastic-plastic materials. *Fracture and Structural Integrity*, 2013, vol. 24, pp. 59–91.
10. Loskutov A.Yu., Mikhailov A.S. Vvedenie v sinergetiku [Foundations of Synergetics]. Moscow, Nauka, 1990. 272 p.
11. Jing L., Stephansson O. Fundamentals of discrete element method for rock engineering: theory and applications. London, Elsevier, 2007. 562 p.
12. Potyondy D.O., Cundall P.A. A bonded-particle model for rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2004, vol. 41, pp. 1329–1364.
13. Garagash I.A., Nikolaevskiy V.N. Neassotsiirovannye zakony techeniya i lokalizatsii plasticheskoy deformatsii [Non-associated laws of plastic flow and localization of deformation]. *Uspekhi mekhaniki – Advanced Mech.*, 1989, vol. 12, no. 1, pp. 131–183.
14. Stefanov Yu.P. Lokalizatsiya deformatsii i razrushenie v geomaterialakh. Chislennoe modelirovanie [Deformation localization and fracture in geomaterials. Numerical simulation]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2002, no. 5–6, pp. 67–77.

15. Wilkins M.L. *Computer simulation of dynamic phenomena*. Heidelberg, Springer-Verlag, 1999. 246 p.
16. Kushch V.I., Shmegeera S.V., Sevostianov I. SIF statistics in micro cracked solid: effect of crack density, orientation and clustering. *Int. J. Eng. Sci.*, 2009, vol. 47, pp. 192–208.
17. Chernykh V.A. Model izmeneniya pronitsaemosti neodnorodnoy gornoy porody v protsesse deformatsii [The model of variation of permeability of inhomogeneous rock during deformation process]. *FTPRPI – Journal of Mining Science*, 1990, no. 1, pp. 126–128.
18. Cushman J.H. *The physics of fluids in hierarchical porous media: angstroms to miles*. Heidelberg, Springer, 1997. 469 p.
19. Khavkin A.Ya. *Nanoyavleniya i nanotekhnologii v dobyche nefti i gaza* [Nano-effects and nano-technologies in oil and gas mining]. Moscow; Izhevsk, HITS «Regular and Chaotic Dynamics», 2010. 692 p.
20. Alexeev A.D., Vasilenko T.A., Gumennik K.V., Kalugina N.A., Feldman E.P. Diffuzionno-filtratsionnaya model vykhoda metana iz ugolnogo plasta [Diffusion-filtration model of methane escape from a coal seam]. *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, 2007, vol. 52, no. 4, pp. 456–465.
21. Khristianovich S.A. Ob osnovakh teorii filtratsii [Fundamentals of seepage theory]. *Journal of Mining Science*, 1989, vol. 25, no. 5, pp. 397–412.
22. Ettinger I.L., Kovaleva I.B. Napryazheniya nabukhaniya i svoidnaya energiya v sisteme gaz-ugol [Swelling stress and the free energy of the gas-coal system]. *Doklady Akademii Nauk SSSR – Proceedings of the Russian Academy of Science*, 1979, vol. 244, no. 3, pp. 659–663.
23. Alekseev A.D., Sinolitskiy V.V. Teoriya absorbtzii gaza poristymi veshchestvami [The theory of gas absorption by porous matters]. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy – Physics and Techniques of High Pressure*, 1983, no. 12, pp. 103–106.
24. Grinyaev Yu.V., Psakhie S.G. O fazovykh perekhodakh gaza v 2D nanopore [On phase transitions of a gas in 2D nano-pore]. *Fizicheskaya mesomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2013, vol. 16, no. 4, pp. 105–108.
25. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of Multiphase Media]. New York, Hemisphere, 1990. Vol. 2, 371 p.
26. Markic M., Sachsenhofer R.F. Petrographic composition and depositional environments of the Pliocene Velenje lignite seam (Slovenia). *Int. J. Coal Geol.*, 1997, vol. 33, pp. 229–254.
27. Pezdic J., Markic M., Letic M. Laboratory simulation of adsorption-desorption processes on different lignite lithotypes from the Velenje lignite mine. *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 1999, vol. 46, no. 3, pp. 555–568.
28. Zula J., Pezdic J., Zavsek S. Adsorption capacity of the Velenje lignite: methodology and equipment. *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 2011, vol. 58, no. 2, pp. 193–216.

УДК 550.831.01

РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ГЕОТЕРМИИ ДЛЯ ТРЕХМЕРНОЙ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ

Пятаков Юрий Владиславович,

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры информационных
и управляющих систем Воронежского государственного университета
инженерных технологий,
Россия, 394036, г. Воронеж, пр. Революции, д. 19.
E-mail: pyatakovjv@mail.ru

Рассмотрена математическая постановка прямой трехмерной задачи геотермии в стационарной и нестационарной формах. Особенностью рассмотренной постановки задачи является возможность учета неоднородности строения моделируемого объекта по плотностным и теплофизическим параметрам. С этой целью вводится система типовых аппроксимирующих элементов – вертикальных призм с произвольными верхним и нижним основаниями и постоянными значениями плотности, коэффициентов тепло- и температуропроводности, а также плотности тепловыделения, обусловленного распадом радиоактивных элементов осадочных горных пород. На границе моделируемого объема заданы условия смешанного типа: величина теплового потока из основания и температура, определяемая по значениям векового хода температур земной поверхности. В задачах оценки прогнозных ресурсов нефтегазоносных территорий рассматриваемые граничные значения позволяют учитывать палеоклиматические условия генерации нефтяных углеводородов. Решение задачи построено на основе методов теории потенциала и теории линейных интегральных уравнений. Точность и быстродействие алгоритмов демонстрируется расчетами тестовых примеров.

Ключевые слова:

Прямая задача геотермии, радиоактивные элементы, теплофизические параметры, типовой аппроксимирующий элемент, тепловой поток, вековой ход температур земной поверхности, оценка прогнозных ресурсов нефтегазоносных территорий, теория потенциала, теория линейных интегральных уравнений.

Введение

Тепловое поле Земли является одним из важнейших физических полей, способным определять как историю геологического развития планеты, так и особенности формирования месторождений полезных ископаемых.

При прогнозировании и локализации месторождений в комплексе с другими геофизическими методами применяются *геотермические методы*, косвенно указывающие на наличие залежей углеводородов (УВ) [1, 2].

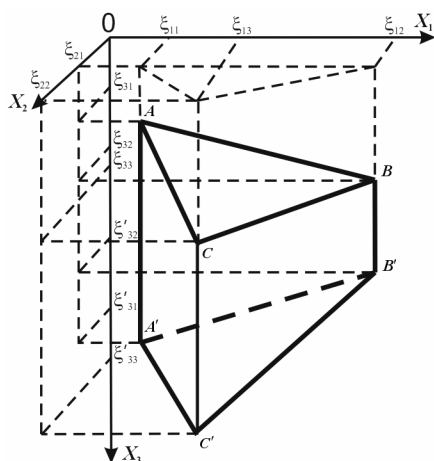


Рис. 1. К решению прямой задачи геотермии. Аппроксимирующая вертикальная треугольная призма. Условные обозначения и пояснения в тексте

В прямых задачах геотермии необходимо определить распределение температуры в моделируемом объеме, неоднородном как по плотностным

параметрам, так и по теплофизическим свойствам (теплоемкости, тепло- и температуропроводности).

Чтобы учесть неоднородность объекта моделирования D , как и в задачах гравиметрии и геодинамики [3, 4], будем полагать его состоящим из N подобластей – вертикальных призм D_n (рис. 1), имеющих постоянные значения плотности и теплофизических параметров.

Задачи геотермии связаны с решением уравнений теплопроводности, которые, как правило, рассматриваются в двух формах: стационарной (когда искомые значения температуры и граничные условия предполагаются не зависящими от времени) и нестационарной. Рассмотрим нестационарную постановку задачи.

Прямая задача геотермии в нестационарной форме

Постановка задачи. В нестационарной форме система уравнений теплопроводности может быть записана следующим образом:

$$\partial \theta(t, \mathbf{x}) / \partial t = a_n \nabla^2 \theta(t, \mathbf{x}) + f_n(t, \mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in D_n, \quad (1)$$

где $\theta(t, \mathbf{x})$ – значение температуры в точке $\mathbf{x}$ в момент времени t ; $a_n = \lambda_n / (\rho_n c_n)$ – коэффициент температуропроводности; ρ_n – плотность; c_n – удельная теплоемкость; λ_n – коэффициент теплопроводности; $f_n(t, \mathbf{x})$ – значение плотности тепловыделения внутренних источников тепла в D_n .

Будем считать известным в начальный момент времени $t=0$ значение температуры:

$$\theta(0, \mathbf{x}) = \theta_n^{(0)}(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in D_n. \quad (2)$$

Граничные условия в уравнениях теплопроводности в зависимости от решаемых задач могут определяться по-разному: заданным значением

температуры, условием теплообмена с внешней средой и др.

Здесь, в соответствие с работой [2], граничные условия определим следующим образом (рис. 2, а).

Пусть $\partial D = S_1 \cup S_2$, при этом

- на поверхности S_1 будем считать заданным значение температуры

$$\theta(t, \mathbf{x}) = \theta^{(1)}(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in S_1; \quad (3)$$

где $\theta^{(1)}(\mathbf{x})$ определяется, например, значениями *векового хода температур земной поверхности*. В задачах оценки прогнозных ресурсов нефтегазовых территорий объёмно-генетическим методом условия (3) позволяют учитывать *палеоклиматические условия* генерации нефтяных УВ [2].

- на поверхности S_2 будем считать заданным значение плотности теплового потока $q(t, \mathbf{x})$:

$$\lambda(\mathbf{x}) \partial \theta(t, \mathbf{x}) / \partial \mathbf{n} = -q(t, \mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in S_2; \quad (4)$$

Здесь $\mathbf{n} = \mathbf{n}(\mathbf{x})$ – вектор внешней нормали к поверхности ∂D в точке $\mathbf{x}$; $\lambda(\mathbf{x}) = \lambda_p$, $\mathbf{x} \in \partial D_p \cap S_2$ (рис. 2, б), $p=1, 2, \dots, N$. Величины теплового потока из основания осадочного разреза в некоторых случаях практических расчетов могут приниматься постоянными, как, например, начиная с юрского времени для условий центральной части Западно-Сибирской плиты [5].

- на поверхности контактов смежных областей D_n и D_k считаем заданными условия непрерывности значений температуры и теплового потока:

$$\lim_{\mathbf{x}' \rightarrow \mathbf{x}} \theta(t, \mathbf{x}') = \lim_{\mathbf{x}'' \rightarrow \mathbf{x}} \theta(t, \mathbf{x}''), \quad (5)$$

$$\lambda_n \cdot \lim_{\mathbf{x}' \rightarrow \mathbf{x}} \partial \theta(t, \mathbf{x}') / \partial \mathbf{n}' + \lambda_k \cdot \lim_{\mathbf{x}'' \rightarrow \mathbf{x}} \partial \theta(t, \mathbf{x}'') / \partial \mathbf{n}'' = 0, \quad (6)$$

где $\mathbf{x}' \in D_n$, $\mathbf{x}'' \in D_k$; $\mathbf{n}'$ и $\mathbf{n}'' = \mathbf{n}(\mathbf{x})$ – соответственно, значения векторов внешних нормалей к ∂D_p и ∂D_k в точке $\mathbf{x}' \in S_{nk}$; $S_{nk} = \partial D_n \cap \partial D_k$ (рис. 2, в).

Под решением прямой задачи будем понимать решение задачи нахождения функции $\theta(t, \mathbf{x})$, удовлетворяющей соотношениям (1)–(6).

Решение задачи. По определению область D представлена совокупностью аппроксимирующих

тел D_n ($D = \bigcup_{n=1}^N D_n$). Поэтому поверхность S_1 , на ко-

торой заданы граничные значения температуры, может быть представлена совокупностью элемен-

тарных площадок S_i^1 ($S_1 = \bigcup_{i=1}^{N_1} S_i^1$), каждая из кото-

рых является частью границы ∂D_m ($S_i^1 = S_1 \cap \partial D_m$) некоторых аппроксимирующих тел D_m (рис. 3, а). Поставим в соответствие каждой площадке S_i^1 значения теплофизических параметров тела D_m и введем следующие обозначения $\rho_i^{(1)} = \rho_m$, $c_i^{(1)} = c_m$, $a_i^{(1)} = a_m$, $\lambda_i^{(1)} = \lambda_m$. Аналогично поверхность S_2 представим на-

бором элементарных площадок S_i^2 ($S_2 = \bigcup_{i=1}^{N_2} S_i^2$) и определим для них величины $\rho_i^{(2)}$, $c_i^{(2)}$, $a_i^{(2)}$, $\lambda_i^{(2)}$.

Обозначим через S_3 совокупность элементарных

площадок S_i^3 ($S_3 = \bigcup_{i=1}^{N_3} S_i^3$), каждая из которых явля-

ется поверхностью контакта некоторых смежных тел D_n и D_k : $S_i^3 = \partial D_n \cap \partial D_k$, $n \neq k$. На площадке S_i^3 выберем произвольным образом одно из двух возможных направлений вектора нормали к S_i^3 и обозначим его через $\mathbf{n}_i^{(3)}$ (рис. 3, б). Пусть D_n – тело, для которого $\mathbf{n}_i^{(3)}$ совпадает с вектором внешней нормали к ∂D_n . Введем обозначения: $\rho_i' = \rho_n$, $\rho_i'' = \rho_k$, $c_i' = c_n$, $c_i'' = c_k$, $\lambda_i' = \lambda_n$, $\lambda_i'' = \lambda_k$, $a_i' = a_n$, $a_i'' = a_k$. Рассмотрим дифференциальный оператор $L(a, \theta(t, \mathbf{x})) = \partial \theta(t, \mathbf{x}) / \partial t - a \nabla^2 \theta(t, \mathbf{x})$. В этом случае уравнение (1) будет иметь вид:

$$L(a_n, \theta(t, \mathbf{x})) = f_n(t, \mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in D_n. \quad (7)$$

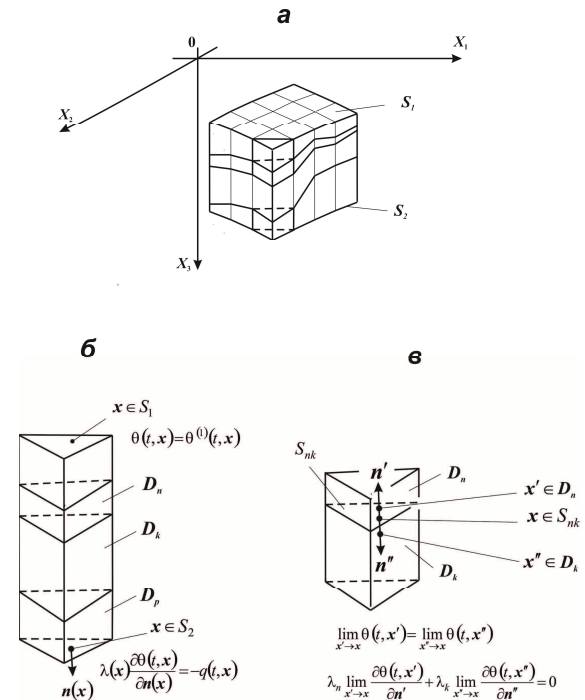


Рис. 2. К постановке прямой задачи геотермии: а) фрагмент моделируемого объема; б) граничные условия задачи; в) контактные условия задачи. Пояснения в тексте

Непосредственной проверкой можно установить справедливость соотношения:

$$\begin{aligned} & \int_0^t \left(L(a_n, \theta(\tau, \xi)) G(a_n, t - \tau, \mathbf{x} - \xi) - \right. \\ & \left. - L(a_n, G(a_n, t - \tau, \mathbf{x} - \xi)) \theta(\tau, \xi) d\xi V d\tau \right) = \\ & = - \int_{D_n} \theta_n^{(0)}(\xi) G(a_n, t, \mathbf{x} - \xi) d\xi V - \\ & - (\rho_n c_n)^{-1} \int_0^t \int_{\partial D_n} q_n(\tau, \xi) G(a_n, t - \tau, \mathbf{x} - \xi) d\xi S d\tau - \\ & - a_n \int_0^t \int_{\partial D_n} \partial G(a_n, t - \tau, \mathbf{x} - \xi) / \partial \mathbf{n} \cdot \theta(\tau, \xi) d\xi S d\tau. \quad (8) \end{aligned}$$

Здесь $\mathbf{n} = \mathbf{n}(\xi)$ – вектор внешней нормали к ∂D_n ; $\theta_n^{(0)}(\xi)$ – распределение температуры в области D_n в начальный момент времени $t=0$; $q_n(\tau, \xi) = -\lambda_n \partial \theta(\tau, \xi) / \partial \mathbf{n}$ – величина теплового потока через элемент $d\xi S$ по-

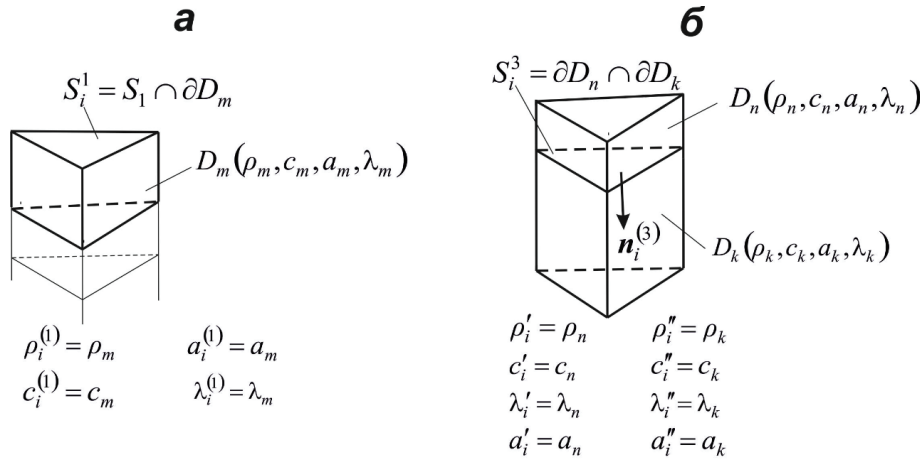


Рис. 3. К решению прямой задачи геотермии. Пояснения в тексте

верхности ∂D_n в точке $\xi \in \partial D_n$ в момент времени τ ; $G(a_n, t - \tau, \mathbf{x} - \xi)$ – функция температурного влияния мгновенного источника тепла [6]:

$$G(a_n, t - \tau, \mathbf{x} - \xi) = (2\sqrt{\pi a_n(t - \tau)})^{-3} \times \exp(-R^2(\mathbf{x} - \xi) / (4a_n(t - \tau))),$$

представляющая собой решение фундаментального уравнения

$$L(a_n, G(a_n, t - \tau, \mathbf{x} - \xi)) = \delta(t - \tau)\delta(\mathbf{x} - \xi). \quad (9)$$

$$(B(9) \ R(\mathbf{x} - \xi) = \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2}).$$

Если функция $\theta(t, \mathbf{x})$ удовлетворяет уравнению (7), то, на основании (9), из тождества (8) получим следующее соотношение:

$$\begin{aligned} k_n(\mathbf{x})a_n\theta(t, \mathbf{x}) = & \\ = a_n \int_0^t \int_{D_n} f_n(\tau, \xi) G(a_n, t - \tau, \mathbf{x} - \xi) d\xi V d\tau + & \\ + a_n \int_{D_n} \theta_n^{(0)}(\xi) G(a_n, t, \mathbf{x} - \xi) d\xi V + & \\ + (\rho_n c_n)^{-1} a_n \int_0^t \int_{\partial D_n} q_n(\tau, \xi) G(a_n, t - \tau, \mathbf{x} - \xi) d\xi S d\tau + & \\ + (a_n)^2 \int_0^t \int_{\partial D_n} \partial G(a_n, t - \tau, \mathbf{x} - \xi) / \partial \mathbf{n} \cdot \theta(\tau, \xi) d\xi S d\tau, \end{aligned} \quad (10)$$

где $k_n(\mathbf{x})=1$, при $\mathbf{x} \in D_n$ и $k_n(\mathbf{x})=0$, при $\mathbf{x} \notin D_n$.

Просуммировав соотношения (10) по всем областям D_n , $n=1, 2, \dots, N$, получим выражение для функции $\theta(t, \mathbf{x})$ в виде суммы объемных потенциалов, потенциалов простого и двойного слоя:

$$\theta(t, \mathbf{x}) = a_n^{-1} [\theta_1(t, \mathbf{x}) + \theta_2(t, \mathbf{x}) + \theta_3(t, \mathbf{x})], \quad \mathbf{x} \in D_n, \quad (11)$$

где, с учетом введенных обозначений,

$$\begin{aligned} \theta_1(t, \mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N a_i \int_0^t \int_{D_i} f_i(\tau, \xi) G(a_i, t - \tau, \mathbf{x} - \xi) d\xi V d\tau + & \\ + a_i \int_{D_i} \theta_i^{(0)}(\xi) G(a_i, t, \mathbf{x} - \hat{\mathbf{i}}) d\xi V, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \theta_2(t, \mathbf{x}) = & \\ = \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^{N_k} a_i^{(k)} \int_0^t \int_{S_i^k} G(a_i^{(k)}, t - \tau, \mathbf{x} - \xi) \frac{q_i^{(k)}(\tau, \xi)}{\rho_i^{(k)} c_i^{(k)}} d\xi S d\tau + & \\ + \sum_{i=1}^{N_3} \int_0^t \int_{S_i^3} \left[\frac{a_i' G(a_i', t - \tau, \mathbf{x} - \xi)}{\rho_i' c_i'} - \frac{a_i' G(a_i'', t - \tau, \mathbf{x} - \xi)}{\rho_i' c_i''} \right] \theta(\tau, \xi) d\xi S d\tau, & \\ \theta_3(t, \mathbf{x}) = & \\ = \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^t \int_{S_i^k} (a_i^{(k)})^2 \frac{\partial G(a_i^{(k)}, t - \tau, \mathbf{x} - \xi)}{\partial \mathbf{n}} \theta_i^{(k)}(\tau, \xi) d\xi S d\tau + & \\ + \sum_{i=1}^{N_3} \int_0^t \int_{S_i^3} \left[\frac{(a_i')^2 G(a_i', t - \tau, \mathbf{x} - \xi)}{\partial \mathbf{n}_i^{(3)}} - \frac{(a_i'')^2 G(a_i'', t - \tau, \mathbf{x} - \xi)}{\partial \mathbf{n}_i^{(3)}} \right] q(\tau, \xi) d\xi S d\tau. \end{aligned}$$

Значения $q(t, \mathbf{x})$ в точках $\mathbf{x} \in S_1$, $\theta(t, \mathbf{x})$, в точках $\mathbf{x} \in S_2$ и $\theta(t, \mathbf{x})$, $q(t, \mathbf{x})$ в точках $\mathbf{x} \in S_i^3$ определяются из решения системы интегральных уравнений, получаемых подстановкой (11) в граничные и контактные условия (3)–(6) [7].

Слагаемое $\int_{D_i} \theta_i^{(0)}(\xi) G(a_i, t, \mathbf{x} - \xi) d\xi V$, входящее

в выражение (12) для объемного потенциала $\theta_i(t, \mathbf{x})$, обеспечивает выполнение начального условия задачи. Использование данного элемента в задачах геотермии позволяет выполнять оценку нестационарных тепловых эффектов, обусловленных влиянием интрузивных тел (локальных источников) [8].

Слагаемое $\int_0^t \int_{D_i} f_i(\tau, \xi) G(a_i, t - \tau, \mathbf{x} - \xi) d\xi V d\tau$ в

(12) позволяет учитывать влияние внутренних источников тепла (тепловыделение распада радиоактивных элементов, содержащихся в осадочных горных породах).

Как отмечено в работе [6], методы теории потенциала, применяемые при решении нестационарных задач теплопроводности, могут быть распространены и на задачи с *подвижными границами* областей. Необходимость в этом возникает в задачах *палеотемпературного моделирования осадочных бассейнов*, требующих определить температурный режим в осадочных слоях в процессе их формирования [2].

Наряду с нестационарной формой постановки задачи геотермии в моделировании могут использоваться стационарные постановки, а также их комбинации [9, 10].

Рассмотрим стационарную постановку задачи геотермии для трехмерной неоднородной по теплофизическим параметрам среды.

Прямая задача геотермии в стационарной форме

Постановка задачи. В стационарной форме система уравнений теплопроводности имеет вид:

$$\lambda_n \nabla^2 \theta(\mathbf{x}) + \hat{f}_n(\mathbf{x}) = 0, \quad \mathbf{x} \in D_n, \quad (13)$$

где $\theta(\mathbf{x})$ – значение температуры в точке $\mathbf{x}$; $\hat{f}_n(\mathbf{x}) = c_n \rho_n f_n(\mathbf{x})$; $a_n, \rho_n, c_n, \lambda_n$ – те же, что и в уравнениях (1); $f_n(\mathbf{x})$ – значение плотности внутренних источников тепла в D_n .

Граничные условия определим следующим образом:

- на поверхности S_1 задано значение температуры

$$\theta(\mathbf{x}) = \theta^{(1)}(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in S_1; \quad (14)$$

- на поверхности S_2 задано значение теплового потока $q(\mathbf{x})$:

$$\lambda(\mathbf{x}) \partial \theta(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{n} = -q(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in S_2; \quad (15)$$

здесь $\mathbf{n} = \mathbf{n}(\mathbf{x})$ – вектор внешней нормали к поверхности dD в точке $\mathbf{x}$; $\lambda(\mathbf{x}) = \lambda_p, \mathbf{x} \in \partial D_p \cap S_2, p = 1, 2, \dots, N$.

- на поверхности контактов смежных областей D_n и D_k считаем заданными условия непрерывности значений температуры и теплового потока:

$$\lim_{\mathbf{x}' \rightarrow \mathbf{x}} \theta(\mathbf{x}') = \lim_{\mathbf{x}'' \rightarrow \mathbf{x}} \theta(\mathbf{x}''), \quad (16)$$

$$\lambda_n \cdot \lim_{\mathbf{x}' \rightarrow \mathbf{x}} \partial \theta(\mathbf{x}') / \partial \mathbf{n}' + \lambda_k \cdot \lim_{\mathbf{x}'' \rightarrow \mathbf{x}} \partial \theta(\mathbf{x}'') / \partial \mathbf{n}'' = 0, \quad (17)$$

где $\mathbf{x}' \in D_n, \mathbf{x}'' \in D_k$; $\mathbf{n}'$ и $\mathbf{n}'' = \mathbf{n}''(\mathbf{x})$ – соответственно, значения векторов внешних нормалей к ∂D_n и ∂D_k в точке $\mathbf{x} \in S_{nk}$; $S_{nk} = \partial D_n \cap \partial D_k$.

Под решением прямой задачи геотермии будем понимать решение задачи нахождения температуры $\theta(\mathbf{x})$, удовлетворяющей соотношениям (13)–(17).

Решение задачи. Как и при решении нестационарной задачи, выражение для $\theta(\mathbf{x})$ определим в виде суммы объемных потенциалов, потенциалов простого и двойного слоя:

$$\theta(\mathbf{x}) = \begin{cases} (4\pi\lambda_n)^{-1} [\theta_1(\mathbf{x}) + \theta_2(\mathbf{x}) + \theta_3(\mathbf{x})], & \mathbf{x} \in D_n, \\ 0, & \mathbf{x} \notin D_n, \end{cases} \quad (18)$$

где

$$\theta_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \int_{D_i} f_i(\xi) R^{-1}(\mathbf{x} - \xi) d\xi V, \quad (19)$$

$$\theta_2(\mathbf{x}) = \int_{S_1} q^{(1)}(\xi) R^{-1}(\mathbf{x} - \xi) d\xi S + \int_{S_2} q(\xi) R^{-1}(\mathbf{x} - \xi) d\xi S, \quad (20)$$

$$\theta_3(\mathbf{x}) = \int_{S_1} \theta^{(1)}(\xi) \partial R^{-1}(\mathbf{x} - \xi) / \partial \mathbf{n} \xi d\xi S + \int_{S_2} \theta^{(2)}(\xi) \partial R^{-1}(\mathbf{x} - \xi) / \partial \mathbf{n} \xi d\xi S + \int_{S_3} \left((\lambda''(\xi) - \lambda'(\xi)) / (\lambda'' \xi) + \right. \\ \left. + \lambda'(\xi) \theta^{(3)}(\xi) \partial R^{-1}(\mathbf{x} - \xi) / \partial \mathbf{n} \xi \right) d\xi S \quad (21)$$

Поверхность $S_3 = \bigcup_{i=1}^{N_3} S_i^3$ в (20) представляет собой совокупность площадок, каждая из которых является поверхностью контакта некоторых смежных тел D_n и D_k : $S_i^3 = \partial D_n \cap \partial D_k, n \neq k$; $\lambda'(\xi) = \lambda_n, \lambda''(\xi) = \lambda_k, \xi \in S_i^3$.

Значения функций $q^{(1)}(\xi), \theta^{(2)}(\xi), \theta^{(3)}(\xi)$, входящих в выражения (20), (21) определяются решением системы интегральных уравнений, получаемых подстановкой (19)–(21) в гранично-контактные условия (14)–(17).

Заметим, что, как и при решении задачи геодинамики [4], необходимые *аналитические составляющие, определяющие значение температурного поля $\theta(\mathbf{x})$ в (19), могут быть определены с помощью соответствующих аналитических составляющих решения прямой задачи гравиметрии.*

Действительно, рассмотрим составляющую решения (19), определяющую влияние внутреннего источника тепловыделения, полагая, что его плотность в области D_i имеет постоянное значение $\hat{f}_i$ (этого всегда с достаточной точностью можно добиться соответствующим разбиением области D_i):

$$\theta(\mathbf{x}) = \hat{f}_i / (4\pi\lambda_n) \int_{D_i} R^{-1}(\mathbf{x} - \xi) d\xi V. \quad (22)$$

Значение интеграла в правой части (22) для принятого аппроксимирующего элемента D_i может быть определено в явном аналитическом виде с помощью формул, приведенных в работе [4].

Для *тестового примера* рассмотрим задачу определения температуры в однородном (имеющем постоянные значения теплофизических параметров a, ρ, c, λ) полупространстве $x_3 > 0$, обусловленном наличием в нем радиоактивного источника с плотностью тепловыделения $f = \hat{f}_n$ при $\mathbf{x} \in D_n$ и $f = 0$ при $\mathbf{x} \notin D_n$. Положим, что на границе $x_3 = 0$ значение температуры равно нулю.

В этом случае, согласно (18)–(21), решение прямой задачи будет иметь вид:

$$\theta(\mathbf{x}) = u(\mathbf{x}) + p(\mathbf{x}),$$

где

$$u(\mathbf{x}) = f / (4\pi\lambda) \int_{D_n} R^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\xi}) d\boldsymbol{\xi} V,$$

$$p(\mathbf{x}) = p(x_1, x_2, x_3) =$$

$$= (4\pi\lambda)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{q^{(1)}(\boldsymbol{\xi})}{\sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3)^2}} d\xi_1 d\xi_2,$$

$q^{(1)}(\boldsymbol{\xi})$ – тепловой поток на границе $x_3=0$.

Выражение для функции $p(x_1, x_2, x_3)$ удобно определить, если воспользоваться формулами (18). Действительно, на основании (18) в точках $x_3 < 0$ $u(\mathbf{x}) + p(\mathbf{x}) = 0$, откуда, в силу очевидной симметрии $p(x_1, x_2, x_3)$ относительно плоскости $x_3=0$, получим решение задачи в виде

$$u(\mathbf{x}) = f / (4\pi\lambda) \int_{D_n} R^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\xi}) d\boldsymbol{\xi} V -$$

$$- f / (4\pi\lambda) \int_{D_n} R'^{-1}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) d\boldsymbol{\xi} V, \quad (23)$$

где

$$R(\mathbf{x} - \boldsymbol{\xi}) = \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2},$$

$$R'(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) = \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 + \xi_3)^2}.$$

Оба интеграла в (23) вычисляются с помощью формул из работы [4].

Тестирование алгоритма решения прямой задачи геотермии

В качестве элемента аппроксимации в тестовом примере используется *вертикальная треугольная призма*.

Координатное описание тела (м), рис. 1: A ($X_1=0, X_2=0, X_3=0$); B (8000, 0, 2000); C (4000, 6000, 10000); A' (0, 0, 12000); B' (8000, 0, 15000); C' (4000, 6000, 18000).

Значения плотности источника и температуропроводности среды примем, согласно данным работы [2], равными соответственно $f=3,16 \cdot 10^{-6}$ Вт/м³ и $\lambda=1$ Вт/(м/град).

В табл. 1 приведены результаты расчетов, полученных по формулам из работы [4], в сопоставлении с расчетами, полученными методом численного интегрирования правой части (23).

Таблица 1. Результаты расчетов теплового поля, обусловленного влиянием внутреннего источника тепловыделения

Координаты точки расчета, м			Расчет по формулам [4], °C	Расчет методом численного интегрирования
X_1	X_2	X_3		
4000	3000	2000	3,88076790	3,88076790
5000	3000	2000	3,71328241	3,71328241
6000	3000	2000	3,40380048	3,40380048
7000	3000	2000	3,00102212	3,00102212
8000	3000	2000	2,56497475	2,56497475
Время расчета, с			$1,1 \times 10^{-4}$	0,7

На рис. 4 приведено распределение температурного поля в плоскости $x_2=3$. Количество точек 6400, время расчета 0,15 с. Среднее время счета алгоритмом по формулам [4] одной точки для одного тела составляет $2,5 \cdot 10^{-5}$ с. Расчеты осуществлялись на ПК, с процессором AMD Phenom II X4 810 (тактовая частота ядра 2,8 ГГц).

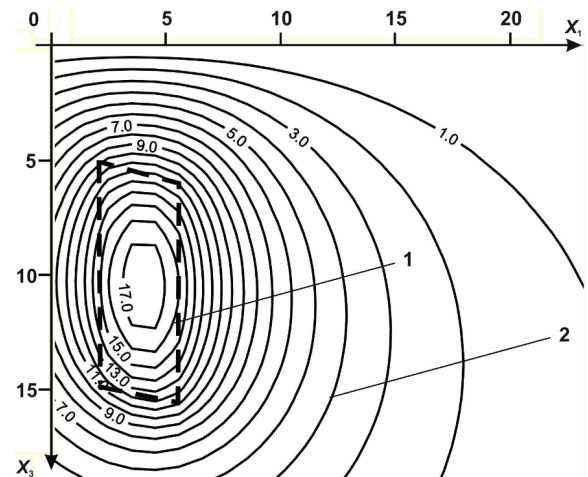


Рис. 4. Расчет температурного поля в плоскости $x_2=3$: 1 – граница источника радиоактивного тепловыделения, 2 – изолинии поля температур, в °C. Оцифровка осей дана в км

Приведенный тестовый пример дает значения температурного эффекта, создаваемого одним аппроксимирующим элементом заданных геометрических размеров. Для того чтобы оценить характер эффекта, создаваемого радиоактивными элементами в осадочных породах, вскрываемых глубокой скважиной, видоизменим пример, увеличив горизонтальные размеры аппроксимирующего тела. Вертикальные координаты вершин верхнего основания положим равными нулю, соответствующие координаты вершин нижнего основания положим равными 10 км. Характерный линейный размер L тела примем равным 1000 км. Таким образом, координатное описание тела на рис. 1 будет иметь вид (км): A ($X_1=0, X_2=0, X_3=0$); B (1000, 0, 0); C (500, 1000, 0); A' (0, 0, 10); B' (1000, 0, 10); C' (500, 1000, 10). Теплофизические параметры оставим прежними. Расчеты проведем вдоль вертикального профиля *гипотетической скважины*, расположенного вблизи центральной части тела в точках с горизонтальными координатами $X_1=500, X_2=500$ и вертикальной координатой, изменяющейся от 0 до 2 км, с шагом 0,2 км.

Результаты, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о том, что в этом случае температура среды изменяется с глубиной по закону, близкому к линейному, увеличиваясь приблизительно на 3 °C через каждые 100 м, что имитирует нормальный геотермический градиент осадочного разреза.

Таблица 2. Результаты расчетов теплового поля s

Координаты точки расчета, км			Значение температуры, °C
X_1	X_2	X_3	
500	500	0	0.0
500	500	0,2	6,16270833
500	500	0,4	1,21990563×10 ¹
500	500	0,6	1,81090046×10 ¹
500	500	0,8	2,38925533×10 ¹
500	500	1,0	2,95497026×10 ¹
500	500	1,2	3,50804527×10 ¹
500	500	1,4	4,04848036×10 ¹
500	500	1,6	4,57627556×10 ¹
500	500	1,8	5,09143088×10 ¹
500	500	2,0	5,59394633×10 ¹
Время расчета, с			2,5×10 ⁻⁴

Выводы

1. Рассмотрена математическая постановка, и предложен алгоритм решения прямой задачи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев В.И., Старостенко В.И. Оценка нефтегазоматеринского потенциала осадочных бассейнов Дальневосточного региона по данным гравиметрии и геотермии // Геофизический журнал. – 2004. – Т. 26. – № 2. – С. 46–61
2. Нефтегазоносность Дальнего Востока и Западной Сибири по данным гравиметрии, геотермии и геохимии / В.И. Исаев, Ю.В. Коржов, Г.А. Лобова, С.А. Попов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 384 с.
3. Пятаков Ю.В., Исаев В.И. Методы решения прямых задач гравиметрии // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 105–110.
4. Пятаков Ю.В., Исаев В.И., Косыгин В.Ю. Методы теории потенциала при решении прямых задач гравиметрии и геодинимики трехмерных неоднородных сред // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 76–83.
5. Ермаков В.И., Скоробогатов В.А. Тепловое поле и нефтегазоносность молодых плит СССР. – М.: Недра, 1986. – 222 с.
6. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 799 с.
7. Купрадзе В.Д. О приближенном решении задач математической физики // Успехи математических наук. – 1967. – Т. XXII. – Вып. 2 (134). – С. 59–107.
8. Термодинамическая эволюция астенотлитов / Р.И. Кутас, А.В. Чекунов, В.И. Лялько, М.М. Митник // Геофизический журнал. – 1993. – Т. 15. – № 4. – С. 3–12
9. Туезов И.К., Епанешников В.Д. Численное моделирование стационарного теплового поля литосферы Охотского моря // Физика Земли. – 1987. – № 7. – С. 94–100.
10. Туезов И.К., Епанешников В.Д. Численное моделирование нестационарного теплового поля литосферы Охотского моря // Тихоокеанская геология. – 1991. – Т. 10. – № 2. – С. 34–42.

Поступила 22.07.2013 г.

UDC 550.831.01

SOLUTION OF GEOTHERMY DIRECT PROBLEM FOR THREE-DIMENSIONAL INHOMOGENEOUS MEDIUM

Yury V. Pyatakov,

Cand. Sc., Voronezh State University of Engineering Technology,
Russia, 394036, Voronezh, Pr. Revolyutsii, 19. E-mail: pyatakovjv@mail.ru.

The paper considers the mathematical formulation of geothermy direct three-dimensional problem for stationary and nonstationary forms. The particularity of the considered formulation is the possibility of accounting heterogeneity structure of the modeled object by density and thermophysical parameters. The author introduces the system of typical approximating elements – vertical prisms with arbitrary upper and lower bases and constant values of density, coefficients of thermal conductivity and thermal diffusivity, as well as the density of heat generation caused by the decay of radioactive elements of sedimentary rocks. On the border of the simulated volume the conditions of mixed type: the value of heat flux from the base and the temperature detected by the values of the secular variation of the Earth's surface temperature were set. In the problems of estimation of predicted resources for the oil and gas regions the considered boundary values allow taking into account paleoclimatic conditions for generation of petroleum hydrocarbons. The theory of potential and the theory of linear integral equations are used as methods for solving this problem. The accuracy and speed of the algorithms are shown by the calculations of test examples.

Key words:

Direct problem of Geothermy, radioactive elements, thermal parameters, typical element of approximation, heat flux, secular variation of the Earth's surface temperature, estimation problems of predicted resources for the oil and gas regions, theory of the potential, theory of linear integral equations.

REFERENCES

1. Isaev V.I., Starostenko V.I. Otsenka neftegazomaterinskogo potentsiala osadochnykh basseynov Dalnevostochnogo regiona po dannym gravimetrii i geotermii [Rating petroleum potential of sedimentary basins of the Far Eastern region by the gravitation and geothermic data]. *Geophysical journal*, 2004, vol. 26, no. 2, pp. 46–61.
2. Isaev V.I., Korzhov Yu.V., Lobova G.A., Popov S.A. Neftegazonosnost Dalnego Vostoka i Zapadnoy Sibiri po dannym gravimetrii, geotermii i geokhimii [Petroleum potential of the Far East and Western Siberia by gravity data, geothermic and Geochemistry]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2011. 384 p.
3. Pyatakov Yu.V., Isaev V.I. Metody resheniya pryamykh zadach gravimetrii [Methods for solving direct problems of gravimetry]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 105–110.
4. Pyatakov Yu.V., Isaev V.I., Kosygin V.Yu. Metody teorii potentsiala pri reshenii pryamykh zadach gravimetrii i geodinamiki trekhmernykh neodnorodnykh sred [The methods of potential theory for solving direct problems gravimetry and geodynamics of three-dimensional inhomogeneous media]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 76–83.
5. Ermakov V.I., Skorobogatov V.A. *Teplovoe pole i neftegazonosnost molodykh plit SSSR* [Thermal field and Petroleum young plates of the USSR]. Moscow, Nedra, 1986. 222 p.
6. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. *Urvneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow, MSU, 1999. 799 p.
7. Kupradze V.D. O priblizhennom reshenii zadach matematicheskoy fiziki [On the approximate solution of problems in mathematical physics]. *Uspekhi matematicheskikh nauk*, 1967, vol. XXII, Iss. 2 (134), pp. 59–107.
8. Kutas R.I., Chekunov A.V., Lyalko V.I., Mitnik M.M. Termodinamicheskaya evolyutsiya astenolitov [Thermodynamic evolution of asthenolith]. *Geophysical journal*, 1993, vol. 15, no. 4, pp. 3–12.
9. Tuezov I.K., Epaneshnikov V.D. Chislennoe modelirovanie statSIONarnogo teplovogo polya litosfery Okhotskogo morya [Numerical modeling of stationary thermal field of the lithosphere of the Okhotsk Sea]. *Physics of the Solid Earth*, 1987, no. 7, pp. 94–100.
10. Tuezov I.K., Epaneshnikov V.D. Chislennoe modelirovanie nestatSIONarnogo teplovogo polya litosfery Okhotskogo morya [Numerical modeling of nonstationary thermal field of the lithosphere of the Okhotsk Sea]. *Geology of the Pacific Ocean*, 1991, vol. 10, no. 2, pp. 34–42.

УДК 553.98:553.041:552.578:550.8.05

РЕКОНСТРУКЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ НЕФТЕМАТЕРИНСКИХ ТОГУРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ И ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ РЕСУРСОВ ПЛАСТОВ Ю₁₆ И Ю₁₅

Лобова Галина Анатольевна,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геофизики
Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: lobovaga@tpu.ru

Власова Алена Владиславовна,

студент кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: avv11@tpu.ru

Исаева Ольга Степановна,

руководитель Томского филиала ФБУ «Территориальный фонд
геологической информации по Сибирскому федеральному округу»,
Россия, 634034, г. Томск, ул. Мокрушина, д. 9, стр. 16.
E-mail: isaeva_sah@mail.ru

Исаев Валерий Иванович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геофизики
Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: isaevvi@tpu.ru

Для расширения ресурсной базы в Нюрольско-Колтогорском нефтегазоносном районе актуальным является поиск залежей углеводородов в пластах Ю₁₆ и Ю₁₅ нижнеюрского нефтегазоносного комплекса.

Цель работы: выявить перспективные районы нижнеюрского нефтегазоносного комплекса в зоне распространения пластов Ю₁₆ и Ю₁₅.

Методы исследования: палеотемпературное моделирование, основанное на решении обратной и прямых задач геотермии в условиях седиментации, картирование палеоочагов интенсивной генерации нефти по геотемпературному критерию.

Реконструирована термическая история тогурских отложений в пределах Нюрольской мегавпадины и структур ее обрамления. Выявлены и закартированы палеоочаги интенсивной генерации тогурских нефтей. Для нижнеюрского нефтегазоносного комплекса (пласты Ю₁₆ и Ю₁₅) построены карты распределения относительной плотности ресурсов первично-аккумулятивных тогурских нефтей. Выполнено районирование резервуара, предложены первоочередные зоны поисков.

Ключевые слова:

Термическая история тогурских отложений, нижнеюрский нефтегазоносный комплекс, плотность ресурсов первично-аккумулятивных нефтей, Нюрольская мегавпадина.

Введение

Разрабатываемые залежи в Нюрольско-Колтогорском нефтегазоносном районе в основном принадлежат к верхнеюрскому нефтегазоносному комплексу (НГК), фонд структур в котором к настоящему времени практически исчерпан. Высокая плотность сейсморазведочных работ не позволяет надеяться на открытие новых залежей в антиклинальных структурах, а следовательно, и на существенное расширение разведочной и промысловой базы в этом НГК. Поэтому важным направлением геологоразведочных работ здесь являются поиск и разведка залежей углеводородов (УВ) в сложнопостроенных ловушках, в частности приуроченных к нижнеюрскому НГК.

В настоящей работе на основе реконструкции геотемпературного режима материнской тогурской свиты выполнено картирование очагов интенсивной генерации нефтей, проведено районирование территории исследования по плотности прогнозных ресурсов для нижнеюрских пластов Ю₁₅ и Ю₁₆.

Геолого-структурная характеристика территории

Нюрольская мегавпадина – отрицательная структура I порядка изометричной формы, осложняет южную часть Колтогорско-Нюрольского жолоба, протягивающегося в субмеридианальном направлении в юго-восточной части Западно-Сибирской плиты. Депрессия ограничена положительными структурами: с северо-запада – восточным склоном Каймысовского свода; с северо-востока – Средневасюганским мегавалом, с юго-востока – Северо-Межовской мегамоноклиалью. Мегавпадину осложняют структуры более низкого ранга, в том числе структурные элементы III порядка: Кулан-Игайская и Тамрадская впадины, Осовой и Тамянский прогибы, Фестивальный вал и Игольско-Таловое куполовидное поднятие. Ряд локальных складок IV порядка представляют собой основной объем верхнеюрских антиклинальных ловушек (рис. 1, А).

Нюрольская мегавпадина по отражающему горизонту Φ_2 оконтурена изогипсой –3240 м, имеет

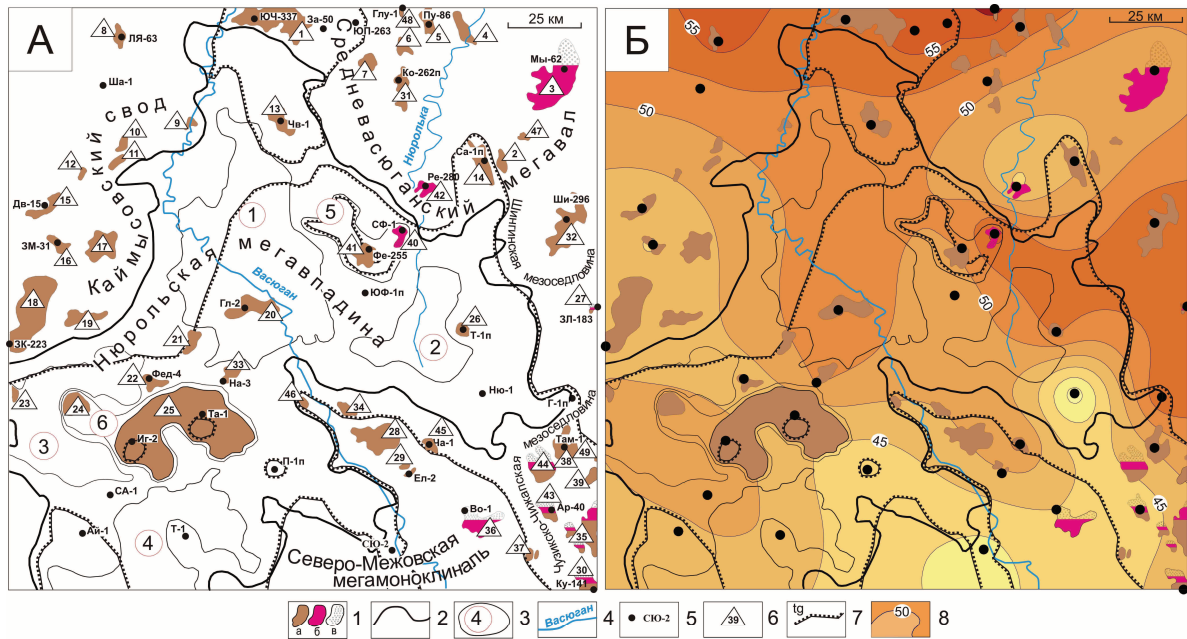


Рис. 1. Схематические карты нефтегазоносности (А) и распределения значений плотности теплового потока из основания (Б) Нюрольской мегавпадины. 1 – месторождения: а) нефтяное, б) конденсатное, в) газовое; 2 – граница Нюрольской мегавпадины; 3 – структура III порядка и ее номер; 4 – речная сеть; 5 – исследуемая скважина и ее условный индекс; 6 – условный номер месторождения; 7 – граница зоны распространения тогурской свиты; 8 – изолинии значений расчетной плотности теплового потока из основания осадочного чехла, мВт/м². Структуры III порядка: 1 – Кулан-Игайская впадина; 2 – Тамрадская впадина; 3 – Осево́й прогиб; 4 – Тамянский прогиб; 5 – Фестивальный вал; 6 – Игольско-Таловое куполовидное поднятие

амплитуду 400 м и площадь 11800 км² [1]. Карбонатные формации с прослоями эффузивов основного, среднего и кислого составов ордовик-каменноугольного возраста слагают доюрский фундамент, который повсеместно перекрыт мощным (до 3500 м) осадочным мезозойско-кайнозойским чехлом. Фрагментарно присутствуют терригенные породы тампейской серии промежуточного пермотриасового этажа [2].

Характеристика нефтегазоносности территории

Для мелового и верхнеюрского НГК основным источником УВ является рассеянное органическое вещество (РОВ) сапропелевого типа *бажендовской свиты* (J_{3vv}). Генерационный потенциал этих отложений в пределах исследуемой территории обусловлен их повсеместным распространением, мощностью (до 30 м) и высоким содержанием Сорг (до 12 %).

Для средне-, нижнеюрских и палеозойского НГК основной генерирующей толщей определена [3] *тогурская нефтематеринская свита* (J_{1t_1}). Её распространение в Нюрольской мегавпадине ограничивается пониженными формами рельефа, выклиниванием к окаймляющим положительным структурам и к выступам кристаллического фундамента на Фестивальном вале, Игольско-Таловом куполовидном поднятии, Пешеходной площади (рис. 1, А). Высокое содержание гумусово-сапропелевого Сорг (до 10 %) и катагенетическая преобразованность РОВ на уровне градаций МК₁²–МК₂ [4]

определяют её региональный генерационный потенциал.

Рассматриваемый в работе *нижнеюрский НГК* объединяет пласты Ю₁₇₋₁₆ урманской (J_{1h-p}) и Ю₁₅ салатской (J_{1t_2} – J_{2a_1}) свит. Урманская свита, согласно [5], формируется в геттанг-плинсбахское время и отвечает началу формирования осадочного чехла. Месторождения углеводородов нижнеюрского НГК (табл. 1) связаны со структурно-литологическими и тектонически экранированными ловушками.

Базальный *пласт* Ю₁₇ нижнеурманской под-свиты, сложенный разнотекстурными полимиктовыми песчаниками и гравелитами, занимает ограниченные пространства в наиболее погруженных участках впадины.

Пласт Ю₁₆ формируется в позднем плинсбахе – раннем тоаре с трансгрессивным, более широким залеганием по латерали. Хотя площадь его распространения значительно увеличивается, формирование отложений также приурочено к достаточно узким руслам палеорек, огибающим с юго-востока и юго-запада Лавровский выступ и небольшие останцы фундамента (рис. 2, А). По [6] наиболее перспективными представляются зоны разгрузки палеопотоков с палеовершин эрозионных выступов фундамента, сложенных магматическими породами кислого состава, где формируются коллекторы с хорошими фильтрационно-емкостными свойствами. С этими отложениями связаны промышленная залежь нефти на Майском месторож-

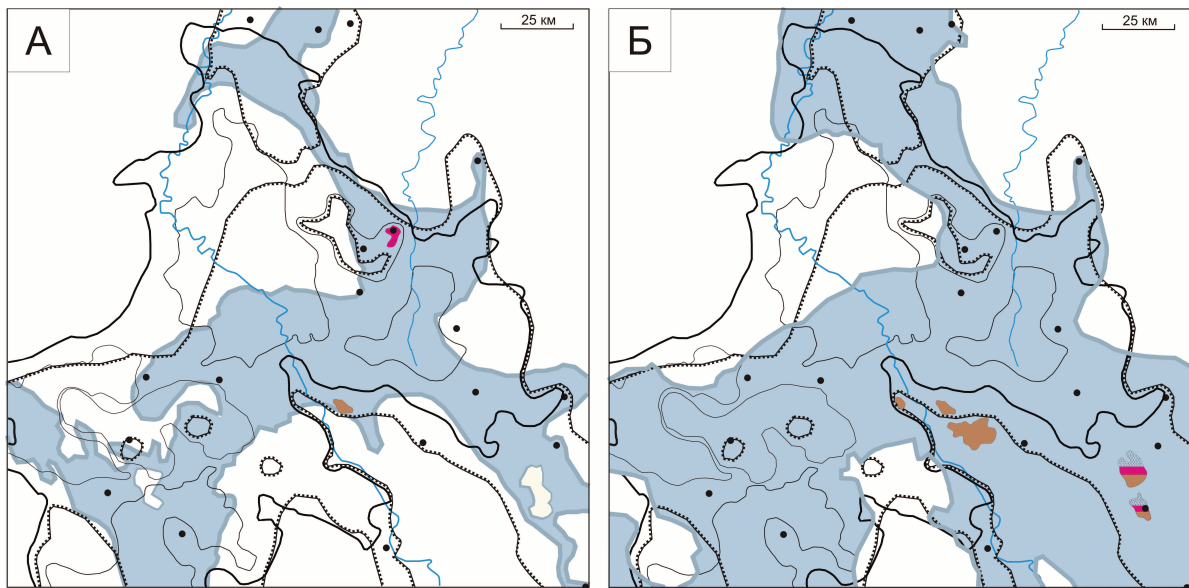


Рис. 2. Схематические карты распространения (контур и заливка) пластов Ю₁₆ (А) и Ю₁₅ (Б) нижнеюрского НГК Норильской мегавпадины (на основе [6]). Показаны месторождения Майское, Северо-Фестивальное с залежами в пласте Ю₁₆ (А) и Южно-Майское, Майское, Арчинское, Урманское, Среднемайское с залежами в пласте Ю₁₅ (Б). Остальные условные обозначения те же, что на рис. 1

дении и залежь газоконденсата на Северо-Фестивальном месторождении. Непромышленные притоки получены при испытаниях этого пласта на Нижнетабаганской, Широной, Южно-Табаганской, Южно-Фестивальной и ряде других площадей. Отложения тогурской свиты почти полностью перекрывают нижележащую урманскую свиту и, в случае их достаточной мощности, служат покровной для залежей в нижележащих пластах Ю₁₇₋₁₆.

Площадь аккумуляции осадков салатской свиты увеличена, и песчаный пласт Ю₁₅ имеет более широкое распространение, чем пласт Ю₁₆ (рис. 2, Б). При приближении к палеовыступам доюрского основания он нередко объединяется в одну песчаную

толщу с вышележащим пластом, образуя общий резервуар с единой залежью (Ю₁₄₋₁₅), как на Среднемайском месторождении. На сегодняшний день открыто 3 нефтяных и 2 нефтегазоконденсатных месторождения с залежами в пластах-коллекторах салатской свиты (табл. 1). Непромышленные притоки УВ получены при испытании пласта Ю₁₅ в скважинах на Широной, Северо-Айсазской, Тамбаевской, Черталинской, Нижнетабаганской площадях, признаки нефтепроявлений в керне отмечены в 27 скважинах.

В табл. 1 приводится характеристика месторождений, попадающих в контур территории исследований, с залежами в нижнеюрском НГК.

Таблица 1. Характеристика месторождений Норильской мегавпадины и структур её обрамления с залежами в нижнеюрском НГК

Месторождение	Условный номер (на рис. 1)	НГК	Фазовое состояние	Горизонт (пласты)
Южно-Майское	28	Верхнеюрский	Нефть	Ю ₁
		Нижнеюрский	Нефть	Ю ₁₅
Майское	34	Верхнеюрский	Нефть	Ю ₁ ³⁻⁴
		Нижнеюрский	Нефть	Ю ₁₆₋₁₅
Северо-Фестивальное	40	Нижнеюрский	Газоконденсат	Ю ₁₆
Арчинское	43	Верхнеюрский	Газоконденсат	Ю ₁ ¹
		Среднеюрский	Нефть	Ю ₁₄
		Нижнеюрский	Нефть	Ю ₁₅
		Палеозойский	Газоконденсат	М ₁
Урманское	44	Среднеюрский	Нефть	Ю ₇ , Ю ₁₄
		Нижнеюрский	Нефть	Ю ₁₅
		Палеозойский	Газоконденсат	М, М ₁
Среднемайское	46	Верхнеюрский	Нефть	Ю ₁ ³⁻⁴
		Нижнеюрский	Нефть	Ю ₁₄₋₁₅

О методике реконструкций геотемпературного режима и картирования очагов генерации тогурских нефтей

Восстановление термической истории отложенной тогурской свиты выполнено с использованием компьютерной технологии палеотемпературного моделирования [7]. Схема расчета палеотемператур состоит из решения обратной и прямых задач геотермии в условиях седиментации.

Для палеотемпературного моделирования выбраны 23 представительные скважины (табл. 2), расположенные в зоне распространения тогурских отложений (рис. 1, А). В качестве «наблюдаемых» использованы пластовые температуры, полученные при испытании скважин, и палеотемпературы, пересчитанные по отражательной способности витринита (OCB) – R_{vt}^0 .

Рассчитанные палеотемпературы в отложениях тогурской свиты (гумусовое РОВ) в заданные моменты геологического времени и температурная градация зон катагенеза интенсивной генерации и эмиграции УВ [4] позволяют прогнозировать вхождение материнских пород в главную зону нефтеобразования (ГЗН) и начало интенсивной генерации тогурских нефтей – с 95°C (MK_1^2).

По значениям теплового потока, полученным в результате решения обратной задачи в разрезах 23-х скважин, методом интерполяции построена схематическая карта *распределения значений плотности теплового потока* из основания (рис. 1, Б).

По рассчитанным палеотемпературам построены схематические карты на 22 ключевых момента геологического времени – время начала/окончания формирования каждой свиты. На рис. 3 приведены карты *рассчитанных геотемператур в тогурской свите и положения очагов генерации нефти* на 6 времен, начиная с момента образования первых очагов и завершая настоящим временем.

Термическая история тогурской свиты

Условия ГЗН для тогурских нефтей наступают 91,6 млн л назад в альб-сеномане. Очаги интенсивной генерации нефти локализуются в центральной части Нюрольской мегавпадины и на северо-восточном борту депрессии (рис. 3, А). В турон-сантоне, начиная с 86,5 млн лет назад (время начала формирования ипатовской свиты), территория очага увеличивается, охватывая всю центральную часть Нюрольской мегавпадины, распространяясь вдоль восточного её борта на юг. Максимальный прогрев тогурских отложений на этот период достигает 115°C (рис. 3, Б).

61,7 млн лет назад, со времени начала формирования ганькинской свиты, генерация нефтей происходит практически во всей области распространения тогурских отложений, за исключением небольшого участка в юго-западной части территории исследования. Максимальные изотермы в 115°C оконтуривают Налимью площадь, восточный борт Тамрадской впадины, зону сочленения северного борта мегавпадины и Средневасюганского межавала (рис. 3, В).

37,6 млн л назад – время максимального прогрева осадочной толщи, ГЗН занимает всю территорию распространения тогурской свиты. Максимальные палеотемпературы достигают более 130°C (рис. 3, Г).

На рубеже неогенового периода (24 млн л назад) палеотемпературы начинают снижаться, а на юге и юго-востоке небольшие по площади участки выходят из ГЗН (рис. 3, Д). К настоящему времени «остывание» осадочной толщи, связанное с изменением климатических условий в олигоцене, продолжается. Максимальные температуры в тогурской свите снизились до $115...120^\circ\text{C}$. Расширилась и зона отсутствия условий ГЗН на юго-востоке (рис. 3, Е).

Районирование территории по плотности ресурсов первично-аккумуляированных тогурских нефтей

Для районирования территории по степени перспективности нижнеюрского НГК рассчитан условный интегральный показатель относительной плотности генерированных тогурских нефтей R по формуле [8]:

$$R = \sum_{i=1}^{20} (U_i t_i \cdot 10^{-2}),$$

где U_i – расчётная температура очага генерации нефти, $^\circ\text{C}$; t_i – время действия очага, млн лет; количество временных интервалов $i=1,...,20$ определено числом свит по этапам их формирования. Путем интерполяции значений R построена схематическая карта *распределения относительной плотности ресурсов генерированных тогурских нефтей* (рис. 4).

Учитывая площадное распространение пластов Ю₆ и Ю₅, построены *схемы районирования пластов* по относительной плотности ресурсов первично-аккумуляированных тогурских нефтей (рис. 5).

Границы пласта Ю₆ практически не выходят за пределы зоны распространения тогурской свиты (рис. 5, А). Месторождения Северо-Фестивальное с залежью газоконденсата и Майское с нефтяной залежью в этом пласте локализуются в районах с высоким значением интегрального показателя R .

Ореол распространения пласта Ю₁₅ выходит за границы тогурских отложений в пределах Лавровского мезовыступа, небольшого участка в северной части Чузикско-Чижапской мезоседловины и вдоль восточного и западного бортов северного врез-а мегавпадины (рис. 5, Б). Основная часть нефтяных залежей тяготеет к северному склону Лавровского мезовыступа. Здесь локализуется Майское месторождение. Среднемайское месторождение находится на стыке района с самым высоким значением R и самым низким в зоне отсутствия тогурской нефтематеринской свиты. Формирование залежи нефти в пласте Ю₁₅ на Южно-Майском месторождении происходит, вероятно, за счет латеральной миграции УВ из зоны распространения нефтематеринской свиты. В районе с достаточно низким значением R расположены газоконденсатнонефтяные Арчинское и Урманское месторождения.

Таблица 2. Пластовые температуры, полученные при испытаниях глубоких скважин, и палеотемпературы, рассчитанные по ОСВ (R_{vt}^0) в образцах керна

Скважина	Условный индекс скважины (рис. 1, А)	Интервал (глубина), м	Отложения (свита)	Температура пластовая*, °С	R_{vt}^{0**} , %	Палеотемпература по R_{vt}^0 , °С
Южно-Черемшанская 337	ЮЧ-337	2686...2707	Баженовская + васюганская	98	–	–
		2812...2820	Тюменская	103	–	–
Чворовая 1	Чв-1	2744...2776	Васюганская	97	–	–
		2765...2772	Васюганская	97	–	–
		2917	Тюменская	–	0,76	115
Северо-Фестивальная 1	СФ-1	3130...3145	Тюменская	118	–	–
		3145...3165	Тюменская	123	–	–
Южно-Фестивальная 1 параметрическая	ЮФ-1п	2790...2820	Баженовская	90	–	–
		2843	Васюганская	–	0,67	102
		2917	Тюменская	–	0,72	109
		3059	Тюменская	–	0,70	106
Тамратская 1 параметрическая	Т-1п	2853...2860	Васюганская	107	–	–
Нюльгинская 1	Ню-1	2499...2527	Куломзинская	75	–	–
		2700	Марьяновская	–	0,52	83
		2822	Васюганская	–	0,55	87
		2892	Тюменская	–	0,58	91
		2894	Тюменская	–	0,6	94
		3089	Тюменская	–	0,59	92
		3199	Тюменская	–	0,62	96
Федюшкинская 4	Фед-4	2838...2842	Васюганская	92	–	–
		3064...3069	Тюменская	99	–	–
Таловая 1	Та-1	2760	Баженовская	–	0,59	92
		2781...2787	Васюганская	88	–	–
		2798...2806	Васюганская	88	–	–
		2885	Васюганская	–	0,73	111
Игольская 2	Иг-2	2740...2773	Васюганская	95	–	–
		2750...2823	Васюганская	92	–	–
		2760...2773	Васюганская	90	–	–
		2800	Васюганская	–	0,70	106
Северо-Айсазская 1	СА-1	2840...2850	Васюганская	94	–	–
		3262...3281 3292...3310	Кора выветривания	113	–	–
Тальянская 1	Т-1	2442...2521	Куломзинская	82	–	–
Пешеходная 1 параметрическая	П-1п	2262...2295	Куломзинская	71	–	–
		2325...2350	Куломзинская	73	–	–
Северо-Юлжавская 2	СЮ-2	2800	Тюменская	–	0,59	92
		2674...2707	Васюганская	78	–	–
		2800	Тюменская	–	0,59	92
Тамбаевская 1	Там-1	2984...3008	Тюменская	100	–	–
		2936...2957	Тюменская	98	–	–
		2754...2762	Тюменская	87	–	–
		2682...2694	Тюменская	86	–	–
		2593...2597	Васюганская	84	–	–
Чагвинская 1	Ча-1	2641...2647	Васюганская	88	–	–
Кулгинская 141	Ку-141	2660...2662	Васюганская	82	–	–
		2753...2763	Тюменская	84	–	–
		2791...2795	Тюменская	86	–	–
Салатская 1 параметрическая	Са-1п	2640	Тюменская	–	0,58	91
		2962	Тогурская	–	0,59	111
Налимья	На-3	2885...2891	Васюганская	98	–	–
		2917	Васюганская	–	0,76	115
		3282	Тогурская	–	0,80	120
Фестивальная 255	Фе-255	2793	Васюганская	–	0,66	101
		3122	Тюменская	–	0,80	120
		3159	Тюменская	–	0,80	120
Заячья 50	За-50	2835	Васюганская	–	0,75	114
		2840	Васюганская	–	0,80	120
Южно-Пионерская 263	ЮП-263	2663	Баженовская	–	0,76	115
		2707	Васюганская	–	0,76	115

* – Испытания глубоких скважин изучены и сведены из первичных «дел скважин» (фондовые материалы Томского филиала ФГУ «ТФИ по СФО»). ** – ОСВ определены в лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (г. Новосибирск).

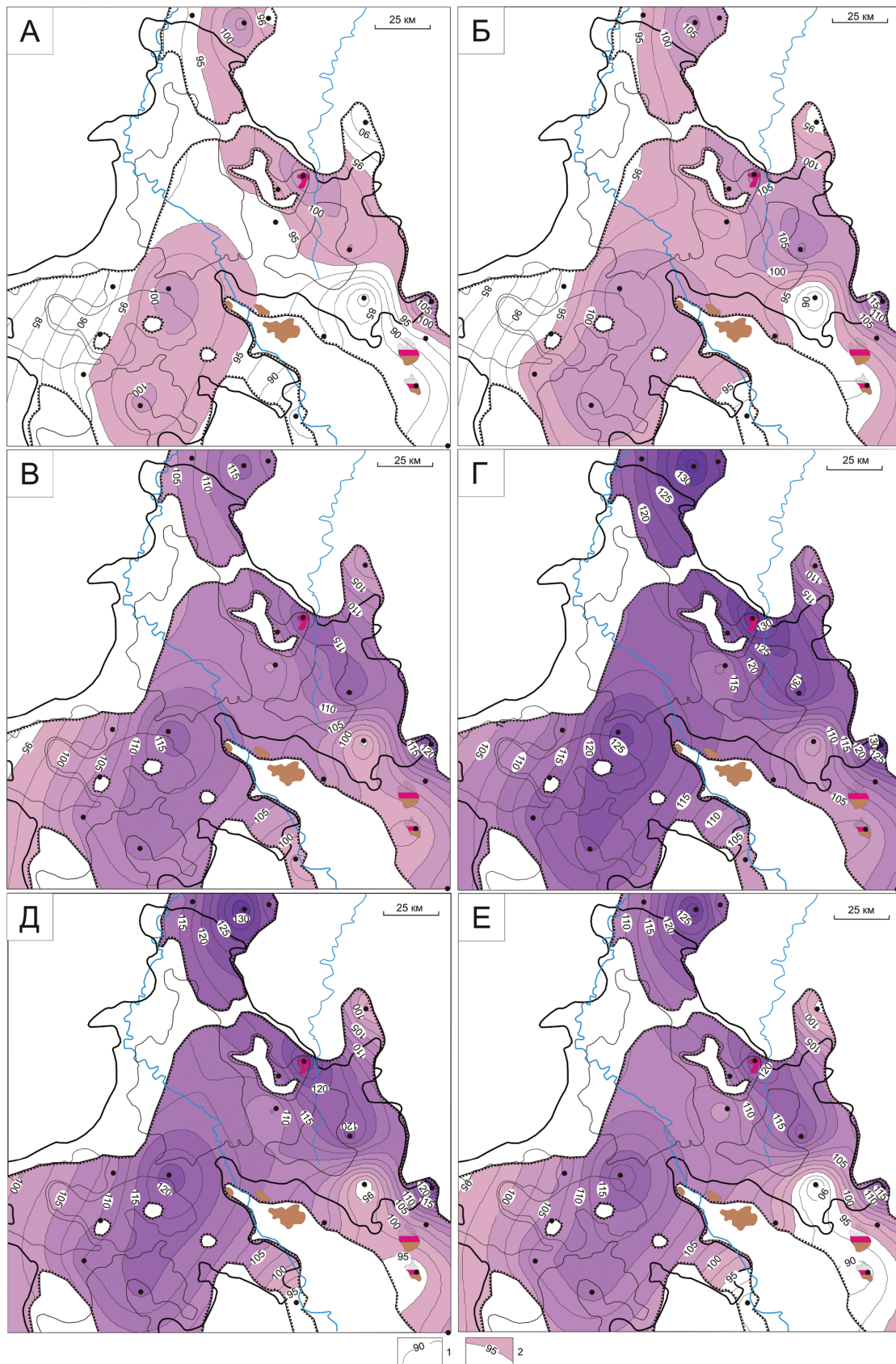


Рис. 3. Схематические карты распределения расчетных геотемператур и положения очагов интенсивной генерации тогурских нефтей 91,6 млн л назад (А), 86,5 млн л назад (Б), 61,7 млн л назад (В), 37,6 млн л назад (Г), 24 млн л назад (Д) и в современном разрезе (Е). 1 – изотермы, °С; 2 – контур очага. Показаны месторождения с залежами в нижнеюрском НГК. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 1

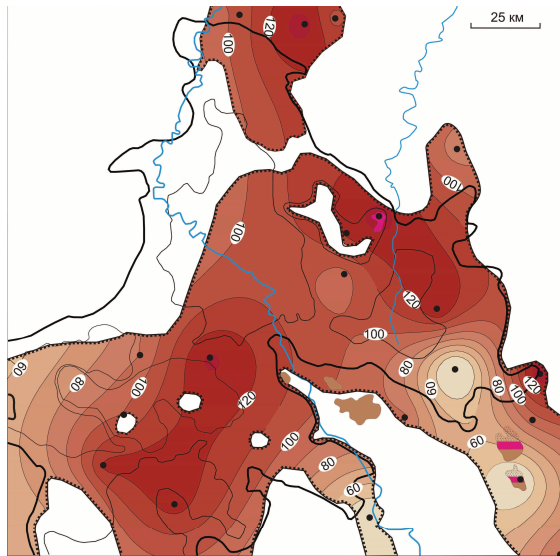


Рис. 4. Схематическая карта распределения значений (усл. ед.) относительной плотности ресурсов генерированных тогурских нефтей Нюрольской мегавпадины. Показаны месторождения с залежами в нижнеюрском НГК. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 1

Таблица 3. Районирование пласта Ю₁₆ нижнеюрского НГК Нюрольской мегавпадины по плотности первично-аккумулятивных тогурских нефтей (* – ранжирование по степени перспективности)

Район*	Тектоническая приуроченность	Скважины, расположенные в районе (рис. 1)	Ресурсы, усл. ед.	Площадь, тыс. км ²
1.1	Северо-восточная часть Тамянского прогиба, восточная часть Игольско-Талового куполовидного поднятия, южный борт Кулан-Игайской впадины	На-3, Т-1, СА-1	110...130	2,90
1.2	Восточная часть Фестивального куполовидного поднятия, северный борт Тамрадской впадины	СФ-1, Фе-255	110...130	1,69
1.3	Восточная часть северного вреза Нюрольской мегавпадины	За-50	110...130	0,34
2.1	Центральная и юго-восточная части Кулан-Игайской, южная часть Тамрадской впадин и зона их сочленения	ЮФ-1п	90...110	1,64
2.2	Западная часть северного вреза Нюрольской мегавпадины	–	90...110	0,23
3	Юго-восточный борт Тамрадской впадины, Чузикско-Чижаянская мезоседловина и зона их сочленения	Там-1, Ку-141, Г-1п	70...110	0,35
4.1	Осевой прогиб	Фед-4	50...110	0,39
4.2	Зона сочленения южного борта Нюрольской мегавпадины и Северо-Межовской мегамоноклинали	–	50...110	0,23
5	Юго-восточный борт Нюрольской мегавпадины, Чузикско-Чижаянская мезоседловина	Нью-1	40...90	0,96

Результаты ранжирования районов (зон) пластов Ю₁₆ и Ю₁₅ по величине относительной плотности ресурсов первично-аккумулятивных тогурских нефтей, с учетом величины площадей зон, приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 4. Районирование пласта Ю₁₅ нижнеюрского НГК Нюрольской мегавпадины по плотности первично-аккумулятивных тогурских нефтей (* – ранжирование по степени перспективности)

Район*	Тектоническая приуроченность	Скважины, расположенные в районе (рис. 1, А)	Ресурсы, усл. ед.	Площадь, тыс. км ²
1.1	Северо-восточная часть Тамянского прогиба, восточная часть Игольско-Талового куполовидного поднятия, южный борт Кулан-Игайской впадины	На-3, Т-1, СА-1	110...130	3,67
1.2	Фестивальное куполовидное поднятие, северный борт Тамрадской впадины, южный склон Средневазюганского мегавала	СФ-1, Фе-255, Т-1п	110...130	2,12
1.3	Зона сочленения восточной части северного вреза Нюрольской мегавпадины и юго-западного склона Средневазюганского мегавала	За-50, ЮП-263	110...130	1,01
2.1	Центральная и юго-восточная части Кулан-Игайской, южная часть Тамрадской впадин и зона их сочленения	ЮФ-1п, Ча-1	90...110	2,22
2.2	Западная часть северного вреза Нюрольской мегавпадины	ЮЧ-337	90...110	0,77
3	Зона сочленения юго-восточного борта Нюрольской мегавпадины и Чузикско-Чижаянской мезоседловины	Там-1, Ку-141, Г-1п	70...110	0,87
4.1	Осевой прогиб, северо-западный склон Игольско-Талового куполовидного поднятия и зона их сочленения	Фед-4, ИГ-2	50...110	1,45
4.2	Южная часть Тамянского прогиба	–	50...110	0,54
4.3	Зона сочленения южного борта Нюрольской мегавпадины и Северо-Межовской мегамоноклинали	СЮ-2	50...110	0,48
5	Юго-восточный борт Тамрадской впадины, Чузикско-Чижаянская мезоседловина и зона их сочленения	Нью-1, Ар-40	40...90	2,08
6.1	Лавровский мезовыступ	–	Менее 40	1,74
6.2	Зона сочленения северо-восточного борта Нюрольской мегавпадины и юго-западного склона Северовазюганского мегавала	–	Менее 40	0,41
6.3	Зона сочленения северо-западного борта Нюрольской мегавпадины и восточного склона Каймысовского свода	–	Менее 40	0,62

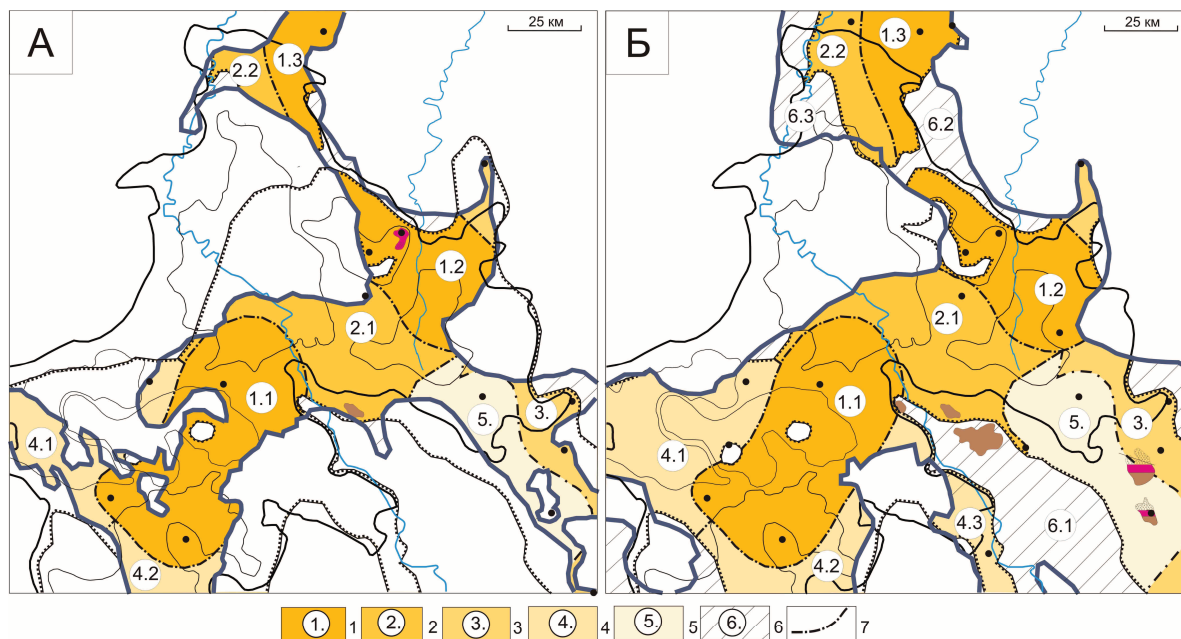


Рис. 5. Схемы районирования пластов Ю₁₆ (А) и Ю₁₅ (Б) нижнеюрского НГК Нюрольской мегавпадины по относительной плотности ресурсов первично-аккумулятивных тогурских нефтей. 1–6 – районы (номер ранжирования; диапазон значений плотности ресурсов, усл. ед.): 1. – 110...130, 2. – 90...110, 3. – 70...110, 4. – 50...110, 5. – 40...90, 6. – менее 40; 7 – границы районов. Показаны месторождения: Майское, Северо-Фестивальное с залежами в Ю₁₆ (А) и Южно-Майское, Майское, Арчинское, Урманское, Среднемайское с залежами в Ю₁₅ (Б). Остальные условные обозначения те же, что на рис. 1

Закключение

Высокоперспективные районы нижнеюрского нефтегазоносного комплекса (пласты Ю₁₆ и Ю₁₅) прогнозируются в центральной части Нюрольской мегавпадины, выделяются на северном борту Тамрадской впадины и далее, на север, в восточной части северного вреза Нюрольской мегавпадины.

Совпадение зон максимальных расчетных значений относительной плотности ресурсов первично-аккумулятивных тогурских нефтей для обоих пластов значительно увеличивает перспективность этих земель и геолого-экономический интерес к ним. Такие участки можно рекомендовать как первоочередные при постановке поисков углеводородов в нижнеюрском НГК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 253 с.
2. Решение 5-го Межведомственного регионального стратиграфического совещания мезозойским отложениям Западно-Сибирской равнины, Тюмень, 1990 г. – Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1991. – 54 с.
3. Гурари Ф.Г., Еханин А.Е. Закономерности размещения углеводородных залежей в нижнеюрских отложениях Западно-Сибирской плиты // Геология и геофизики. – 1987. – № 10. – С. 19–26.
4. Фомин А.Н. Катагенез органического вещества и нефтегазоносность мезозойских и палеозойских отложений Западно-Сибирского мегабассейна. – Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2011. – 331 с.
5. Решение 6-го Межведомственного стратиграфического совещания по рассмотрению и принятию уточненных стратигра-

фических схем мезозойских отложений Западной Сибири, Новосибирск, 2003 г. – Новосибирск: СНИИГТИМС, 2004. – 114 с.

6. Лифанов В.А., Насонова Н.В., Лапина Л.В. Особенности геологического строения базальных пластов Ю_{10–11} в западной части Томской области // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2011. – № 12. – С. 4–11.
7. Термическая история и очаги генерации нефти баженовской свиты центральной части Югорского свода / В.И. Исаев, Г.А. Лобова, С.А. Попов, А.Б. Хашитова // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 1. – С. 38–43.
8. Исаев В.И., Попов С.А., Хашитова А.Б. Очаги генерации и зоны аккумуляции баженовских нефтей центральной части Югорского свода // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 56–64.

Поступила 25.06.2013 г.

RECONSTRUCTION OF THERMAL HISTORY OF PETROMATERNAL TOGUR DEPOSITS AND ASSESSMENT OF DENSITY DISTRIBUTION OF J_{15} AND J_{16} LAYERS RESOURCES

Galina A. Lobova,

Cand Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: lobovaga@tpu.ru

Alena V. Vlasova,

Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: avv11@tpu.ru

Olga S. Isaeva,

Territorial Fund of geological information on Siberian Federal District,
Tomsk branch, Russia, 634034, Tomsk, Mokrushins street, 9, bldg 16.
E-mail: isaeva_sah@mail.ru

Valery I. Isaev,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: isaevvi@tpu.ru

The search of deposits of hydrocarbons in J_{16} and J_{15} layers of the Lower Jurassic oil-and-gas complex is current for expansion of resource base in the Nyurolsko-Koltogorsky oil-and-gas area.

The purpose of the study is to identify the perspective regions of the Lower Jurassic oil-and-gas complex in the distribution zone of J_{16} and J_{15} layers.

The research methods are the paleotemperature modeling based on solution of return and direct problems of geothermics under sedimentation conditions; mapping of paleocenters of oil intensive generation by geotemperature criterion.

The thermal history of Togur deposits within the Nyurolskaya megadepression and structures of its frame has been reconstructed. The paleocenters of Togur oil intensive generation were revealed and sketched on the card. The authors mapped the distribution of relative density of resources for primary accumulated Togur oils for the Lower Jurassic oil and gas complex (layers J_{16} and J_{15}). The authors carried out the reservoir zoning and suggested the primary search areas.

Key words:

Thermal history of the Togur deposits, Lower Jurassic oil and gas complex, density of resources of primary accumulated oils, the Nyurolskaya megadepression.

REFERENCES

1. Kontorovich V.A. *Tektonika i neftegazonosnost mezozoyско-kaynozoyских otlozheniy yugo-vostochnykh rayonov Zapadnoy Sibiri* [Tectonics and petroleum potential of the Mesozoic-Cenozoic deposits of the southeastern region of West Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2002. 253 p.
2. *Reshenie 5 Mezhdomstvennogo regionalnogo stratigraficheskogo soveshchaniya po mezozoyским otlozheniyam Zapadno-Sibirskoy ravniny* [The decision of the 5th meeting of the Interdepartmental Regional Stratigraphic Mesozoic sediments of the West Siberian Plain]. Tyumen, ZapSibNIGNI Publ., 1991. 54 p.
3. Gurari F.G., Ekhanin A.E. Zakonomernosti razmeshcheniya uglevodorodnykh zalezhey v nizhneyurskikh otlozheniyakh Zapadno-Sibirskoy plity [Patterns of distribution of hydrocarbon deposits in the Lower Jurassic sediments of the West Siberian Plate]. *Russian Geology and Geophysics*, 1987, no. 10, pp. 19–26.
4. Fomin A.N. *Katagenez organicheskogo veshchestva i neftegazonosnost mezozoyских i paleozoyских otlozheniy Zapadno-Sibirskogo megabasseyna* [Catagenesis of organic matter and petroleum potential of Mesozoic and Paleozoic deposits of the West Siberian megabasin]. Novosibirsk, INGG SO RAN Publ., 2011. 331 p.
5. *Reshenie 6 Mezhdomstvennogo stratigraficheskogo soveshchaniya po rassmotreniyu i prinyatiyu utochnennykh stratigraficheskikh skhem mezozoyских otlozheniy Zapadnoy Sibiri* [The decision of the 6th Interdepartmental Stratigraphic Meeting to consider and adopt revised stratigraphic schemes of Mesozoic deposits of Western Siberia]. Novosibirsk, SNIIGGiMS Publ., 2004. 114 p.
6. Lifanov V.A., Nassonova N.V., Lapina L.V. Osobennosti geologicheskogo stroeniya bazalnykh plastov J_{10-11} v zapadnoy chasti Tomskoy oblasti [The geological structure of the basal layers of J_{10-11} in the western part of Tomsk region]. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2011, no. 12. pp. 4–11.
7. Isaev V.I., Lobova G.A., Popov S.A., Hashitova A.B. Termicheskaya istoriya i ochagi generatsii nefci bazhenovskoy svity tsentralnoy chasti Yugorskogo svoda [Thermal history and oil generation pockets of Bazhenov suite the central part of arch Yugorski]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 313, no. 1, pp. 38–43.
8. Isaev V.I., Popov S.A., Hashitova A.B. Ochagi generatsii i zony akkumulyatsii bazhenovskikh neftey tsentralnoy chasti Yugorskogo svoda [Outbreaks of generation and accumulation zone of Bazhenov oil in central part of Yugra arch]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 315, no. 1, pp. 56–64.

УДК 552.321.5, 6

РОДОНАЧАЛЬНЫЙ РАСПЛАВ И ГЕОДИНАМИКА РАССЛОЕННЫХ МАФИТ-УЛЬТРАМАФИТОВЫХ МАССИВОВ КАНСКОЙ ГЛЫБЫ ВОСТОЧНОГО САЯНА

Юричев Алексей Николаевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры петрографии
геолого-географического факультета Томского государственного университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: juratur@sibmail.com

Чернышов Алексей Иванович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор, заведующий кафедрой петрографии
геолого-географического факультета Томского государственного университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: aich@ggf.tsu.ru

По результатам моделирования равновесной кристаллизации по программе КОМАГМАТ-3.52 оцениваются вероятные температуры и химический состав родоначальной магмы Талажинского мафит-ультрамафитового массива Канской глыбы (северо-западная часть Восточного Саяна), а также впервые предлагается модель геодинамической обстановки кристаллизации расслоенной серии его пород. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что рассматриваемое интрузивное тело является ритмично-расслоенным плагиодунит-троктолит-анортозит-габбровым массивом, который сформировался в процессе кристаллизационной дифференциации низкотитанистого высокоглиноземистого оливин-базальтового расплава, для которого характерны повышенная магнезиальность при низких концентрациях HFSE, слабая обогащенность LREE, положительная Eu-аномалия. Формирование очагов исходных расплавов происходило за счет толеитовых базальтов океанического плато при их поглощении и дальнейшем плавлении в зоне субдукции. Последующая эволюция расплава обусловлена процессами его перемещения в магматическую камеру, которые сопровождались контаминацией пород континентальной коры.

Ключевые слова:

Талажинский массив, расслоенный комплекс, мафиты, ультрамафиты, моделирование, родоначальный расплав, геодинамика.

Введение

В пределах Канской глыбы Восточного Саяна широким распространением пользуются интрузивы ультраосновных и основных пород [1–5], которые объединяются в четыре комплекса: идарский дунит-гарцбургитовый раннепротерозойского (?) возраста; кингашский никеленосный дунит-верлит-пикритовый «малых» интрузивов, датируемый разными авторами от позднего архея до позднего протерозоя; кулибинский перидотит-пироксенит-габбровый раннепротерозойский и талажинский плагиодунит-троктолит-анортозит-габбровый расслоенный комплекс рифейского (?) возраста. В статье рассматривается Талажинский массив [2, 6], являющийся петротипом одноименного расслоенного комплекса. Он расположен в северо-западной части Канской глыбы на продолжении

Кингашского рудного района [7] (рис. 1). В составе преобладают троктолиты при подчиненной роли плагиодунитов, оливиновых габбро и анортозитов.

Петрографическая характеристика пород

Плагиодуниты – средне-, крупнозернистые (3...8 мм) породы с кумулятивной структурой и массивной текстурой, состоят на 80...90 % из хризолита (Fa_{18-20}) и 5...10 % основного плагиоклаза – битовнита (An_{76-77}). Акцессорные минералы (до 5 %) представлены преимущественно зернами хромшпинелидов и очень редкими индивидами сульфидов (пирротин, пентландит).

Троктолиты – мелко-, крупнозернистые (1...7 мм) иногда порфировидные породы с габбровой структурой. Они состоят на 20...70 % из хризолита ($\text{Fa}_{16,5-17,5}$), на 25...70 % из битовнита (An_{77-81}) и

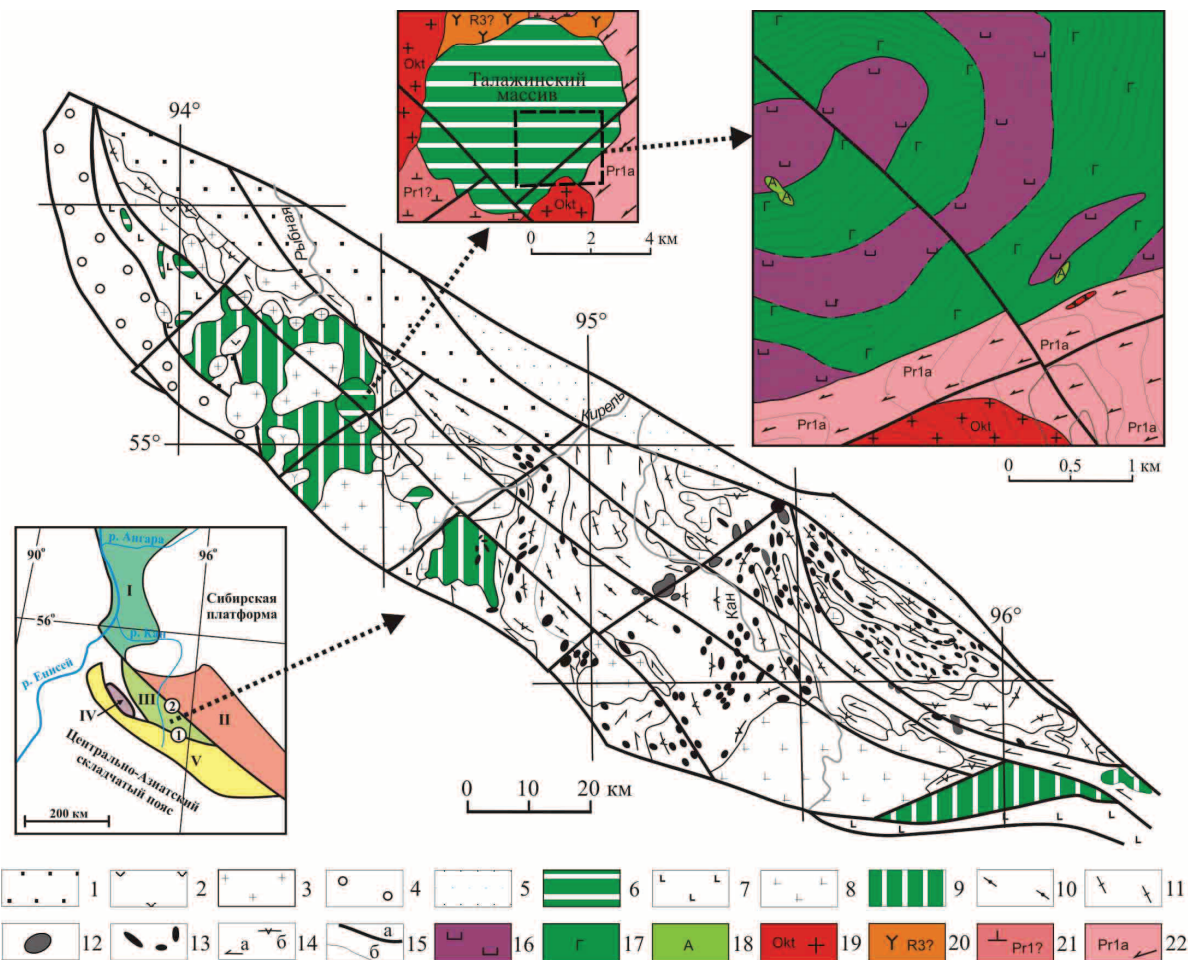


Рис. 1. Геологическое строение Талажинского массива и его положение в региональной структуре (составлено по материалам А.Н. Смагина, А.Г. Еханина, А.Д. Ножкина, О.М. Туркиной, А.И. Чернышова): 1 – верхнепалеозойско-мезозойские преимущественно терригенные отложения: карымовская, павловская и кунгусская свиты; 2 – нижнедевонские (возможно частью ордовикские) вулканиты; 3 – ордовикская лейкогранитовая формация: кутурчинский комплекс; 4 – кембро-ордовикские красноцветные терригенные отложения Баджеевского прогиба; 5 – венд-нижнекембрийские терригенно-карбонатные отложения; 6 – средне-верхнерифейский плагиодунит-троктолит-анортозит-габбровый талажинский комплекс; 7 – средне-верхнерифейские осадочно-вулканогенные образования кувайской серии; 8 – познерифейский гранитоидный канский комплекс; 9 – раннепротерозойская-среднерифейская (?) перидотит-пироксенит-габбровая формация: кулибинский комплекс; 10 – раннепротерозойские амфиболит-гнейсовые толщи анжинского структурно-вещественного комплекса; 11 – раннепротерозойский мигматит-плагиогранитный тукшинский комплекс; 12 – позднеархейский (возможно ранне- и даже позднепротерозойский) дунит-верлит-пикритовый кингашский комплекс малых расслоенных дифференцированных массивов; 13 – позднеархейский-раннепротерозойский (?) дунит-гарцбургитовый идарский комплекс (штоки, дайки, линзы, силы) (часть тел практически не изучены, вероятно, могут принадлежать кингашскому комплексу); 14 – верхнеархейские (?) амфиболитовые (а) и гнейсовые (б) толщи караганского комплекса; 15 – глубинные северо-западные и северо-восточные разломы (а), геологические границы (б); 16–18 – поздне-рифейский Талажинский плагиодунит-троктолит-анортозит-габбровый расслоенный массив: 16 – плагиодуниты, серпентинизированные плагиодуниты, аподунитовые серпентиниты, 17 – троктолиты, метатроктолиты, с редкими прослоями оливинного габбро, 18 – прослои, линзы анортозитов; 19 – ордовикский кутурчинский комплекс; 20 – поздне-рифейская (?) габбро-сиенитовая формация; 21 – раннепротерозойская (?) перидотит-пироксенит-габбровая формация; 22 – раннепротерозойская амфиболитовая толща. На врезке положение Канской глыбы в структурах юго-западного обрамления Сибирской платформы. Выступы кристаллического фундамента платформы: 1 – Ангаро-Канский; 2 – Присаянский. Докембрийские структуры складчатого обрамления: 3 – Канский; 4 – Арзыбейский; 5 – Дербинский блоки. Разломы (цифры в кружках): 1 – Главный Восточносаянский; 2 – Канско-Агульский

до 10 % из гиперстена и роговой обманки, соответствующей магнезиальной и чермакиевой разновидности [8]. Нередко в троктолитах отмечается мелкая (до 0,25 мм) вкрапленная магнетит-ильменит-хромшпинелиевая и пирротин-пентландит-халькопиритовая минерализация.

Оливиновые габбро имеют мелкозернистую габбровую структуру, массивную текстуру и сложены битовнитом (An_{78-85}) – 40...50 %, хризолитом (Fa_{18-19}) – 30...40 % и клинопироксеном до 20 %. В них отмечаются мелкие рудные минералы (до 0,5 мм), аналогичные наблюдаемым в троктолитах.

Анортозиты – мелко-, среднезернистые (1...4 мм) породы с панидиоморфной структурой, а при наличии ксеноморфного клинопироксена приобретают гипидиоморфную. Характерна массивная текстура. Они на 90...100 % состоят из битовнита (An_{74-88}) либо анортита (An_{95-99}), изредка в их составе до 10 % отмечается клинопироксен. Рудные минералы представлены железо-титанистой окисной минерализацией: рутилом, магнетитом, ильменитом и нигрином.

Моделирование родоначального расплава

При моделировании исходного расплава Талажинского массива использовался метод геохимической термометрии, который объединяет несколько подходов к решению обратных петрологических задач, направленных на оценку температуры и состава магматических расплавов, из которых кристаллизовались ультрамафиты и мафиты [9]. В основе метода лежит предположение о равновесном распределении компонентов между первичными кристаллами и жидкостью, а его практическая реализация связана с проведением расчётов по ЭВМ-моделированию кристаллизации расплавов конкретных пород. В случае интрузивных массивов образцы для вычислений выбираются на основе геологических данных по принципу приуроченности к одним и тем же горизонтам или близости расположения в вертикальных разрезах. Это

дает основание предполагать общую температуру и состав интеркумulusного расплава.

Сравнительный анализ составов модельных расплавов при одних и тех же значениях температур позволяет найти области сгущения и пересечения эволюционных линий. Было доказано, что наиболее компактные кластеры составов по петрогенным компонентам формируются в ограниченном диапазоне температур (в пределах 10...15 °С), которые отражают начальные условия формирования генетически родственных пород [10, 11]. При этом среднее значение для температурного интервала пересечений линий эволюции состава жидкости рассматривается как наиболее вероятная температура исходной расплавно-кристаллической смеси, а «равновесный» состав минералов принимается в качестве первичного (исходного). Состав жидкости, находящейся в равновесии с первичными кристаллами, определяет исходный расплав – в том смысле, что он соответствует состоянию смеси до того, как в ней пройдут процессы докристаллизации и (возможно) перекристаллизации.

Для главных разновидностей интрузивных пород Талажинского массива (таблица) было выполнено моделирование фракционной кристаллизации по программе КОМАГМАТ-3.52 [11]. Присутствие в породах массива оксидов железа, а также водосодержащих фаз (амфибола) говорит о том, что фугитивность кислорода в процессе кристаллизации, ве-

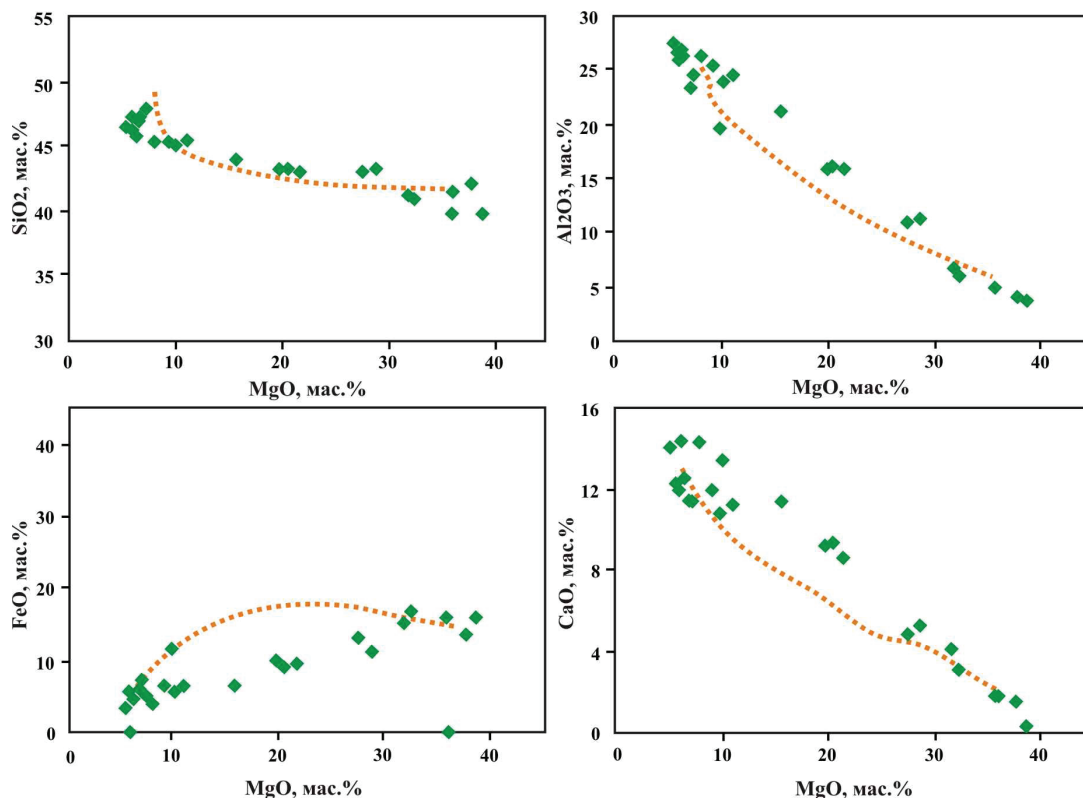


Рис. 2. Бинарные диаграммы породообразующих оксидов для Талажинского массива. Точечный тренд – тренд составов кумулятивных фаз, полученных путем моделирования формирования расслоенного Талажинского интрузива, исходя из состава модельного родоначального расплава по программе КОМАГМАТ-3.52 [11]

роятно, соответствовала буферу QFM (кварц-фаялит-магнетит). Геологические наблюдения (отмеченные ксенолиты роговиков в краевой части массива, устное сообщение А.Н. Смагина, 2008 г.) и петрографические данные (присутствие в минералогическом составе пород незначительного количества позднематматического амфибола, обычно менее 5 %) свидетельствуют об условиях кристаллизации родоначального расплава в процессе формирования расслоенной серии и ограничивают литостатическое давление значением, не превышающим 3 кбар, начальное содержание воды в расплаве не более 0,5 мас. %. Исходя из этого, расчеты проводились в режиме формирования расслоенного интрузива при следующих параметрах системы – давление 1...2 кбар, буфер QFM, содержание воды в расплаве от 0 до 0,5 %, шаг кристаллизации расплава 1 мол. %. Траектории кристаллизации расплавов пород рассчитывались до 66...90 % кристаллов (от 34...10 % остаточной жидкости), в зависимости от состава породы. Согласно результатам расчетов, равновесная кристаллизация расплава Талажинской интрузии происходила в последовательности $Ol \rightarrow Ol+Pl \rightarrow Ol+Pl+Cpx \rightarrow Ol+Pl+Cpx+Opx+Hb$.

Хорошая сопоставимость тренда составов кумулятивных фаз (получены путем моделирования формирования расслоенного интрузива, исходя из состава модельного родоначального расплава по программе КОМАГМАТ-3.52) с составами пород расслоенной серии массива на вариационных диаграммах (рис. 2), сходство фактических и рассчитанных составов минералов из пород расслоенной серии свидетельствуют о приближенности принятых параметров модельной системы к природной.

На рис. 3 приведены результаты расчетов для восьми образцов главных разновидностей пород Талажинского массива, демонстрирующие температурно-композиционную эволюцию остаточных (интеркумулусных) расплавов для девяти породообразующих оксидов. На графиках видно, что расчетные траектории для всех компонентов сближаются и пересекаются в интервале температур 1240...1260 °С, формируя достаточно компактные кластеры в области оливин-плагноклазовоикотектики. Наиболее отчетливо эти пересечения проявлены на диаграммах SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO и P_2O_5 . Исходя из этого, среднее значение 1250 °С можно принять в качестве вероятной температуры родоначальной магмы Талажинского интрузива. Оценка состава этого расплава при 1250 °С может быть получена путем проецирования на оси абсцисс диаграмм на рис. 3 и соответствует (в мас. %): SiO_2 – 46,00, TiO_2 – 0,35, Al_2O_3 – 21,50, FeO_{tot} – 10,00, MgO – 10,00, CaO – 8,00, Na_2O – 2,50, K_2O – 0,50, P_2O_5 – 0,07.

Оцененный таким образом состав родоначальной жидкости отвечает низкотитанистому высокоглиноземистому оливин-базальтовому расплаву. В пользу данного утверждения также свидетельствуют петрохимические особенности пород Талажинского мас-

сива (низкие содержания Ti, низкие отношения $Fe/(Fe+Mg)$, обеднение щелочами, особенно калием и обогащение Mg, Ni и Cr), характерные для пород толеитовой петрохимической серии [12].

Таблица. Химический состав пород расслоенной серии Талажинского массива (мас. %) и распределение в них элементов-примесей (г/т)

№ обр.	5014/7	1093	5011	5014	5003/5	5003/1	5020/2	5015/1
Порода	Плагинодунит			Троктолит		Оливин-габбро	Анортозит	
Элементы								
SiO_2 , мас. %	41,32	41,16	44,85	43,47	47,68	44,10	46,39	46,51
TiO_2	0,15	0,07	0,05	0,10	0,34	0,15	0,12	0,13
Al_2O_3	8,25	6,10	22,31	17,21	24,41	19,20	27,89	27,68
FeO_{tot}	15,98	15,09	6,19	9,77	6,38	8,04	3,90	3,81
MnO	0,20	0,21	0,08	0,12	0,08	0,11	0,04	0,05
MgO	29,62	35,04	14,17	19,85	7,08	17,00	5,75	5,24
CaO	3,56	2,02	10,99	8,28	10,23	10,05	13,19	12,73
Na_2O	0,60	0,17	1,20	0,93	2,91	1,14	2,43	2,51
K_2O	0,25	0,05	0,10	0,21	0,76	0,16	0,17	1,22
P_2O_5	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
Сумма	99,95	99,92	99,95	99,95	99,90	99,95	99,91	99,90
Ga, г/т	7,44	3,81	11,47	9,84	–	11,32	15,69	17,30
Rb	7,31	0,56	1,98	5,03	–	2,83	4,25	42,34
Sr	194,78	47,66	458,20	384,15	–	469,28	798,59	863,99
Y	2,57	0,67	0,74	1,51	–	1,72	1,29	1,85
Zr	13,31	1,96	2,62	6,62	–	4,58	3,67	4,97
Nb	1,06	0,09	0,18	0,60	–	0,20	0,28	0,28
Cs	0,53	0,15	0,54	0,99	–	0,91	0,61	1,73
Ba	68,35	19,41	31,20	35,14	–	47,17	47,12	115,33
La	2,29	0,37	0,81	1,11	–	1,20	1,09	1,03
Ce	4,48	0,74	1,56	2,33	–	2,33	2,29	2,05
Pr	0,58	0,10	0,20	0,29	–	0,30	0,29	0,29
Nd	2,09	0,37	0,77	1,27	–	1,28	1,26	1,21
Sm	0,45	0,09	0,14	0,22	–	0,29	0,24	0,29
Eu	0,15	0,08	0,18	0,17	–	0,24	0,26	0,31
Gd	0,42	0,08	0,14	0,28	–	0,29	0,24	0,33
Tb	0,06	0,01	0,02	0,03	–	0,05	0,03	0,04
Dy	0,38	0,08	0,10	0,21	–	0,26	0,20	0,27
Ho	0,07	0,02	0,02	0,04	–	0,05	0,04	0,05
Er	0,21	0,05	0,05	0,11	–	0,14	0,11	0,13
Tm	0,03	0,01	0,01	0,02	–	0,02	0,02	0,02
Yb	0,21	0,07	0,06	0,10	–	0,12	0,09	0,12
Lu	0,03	0,01	0,01	0,01	–	0,02	0,01	0,02
Hf	0,29	0,04	0,06	0,13	–	0,13	0,08	0,13
Ta	0,13	0,02	0,02	0,04	–	0,04	0,03	0,04
W	0,50	0,28	0,22	0,29	–	0,22	0,49	0,28
Th	0,60	0,03	0,09	0,26	–	0,06	0,09	0,06
U	0,15	0,03	0,03	0,07	–	0,03	0,04	0,02

Примечание: Определение петрохимического состава пород проведено в ИГХ СО РАН (г. Иркутск) на приборе Perkin Elmer, аналитик Т.В. Ожогина; содержание редких элементов выполнено в Аналитическом центре ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) на масс-спектрометре ELEMENT (Finnigan Mat), аналитик С.В. Палесский.

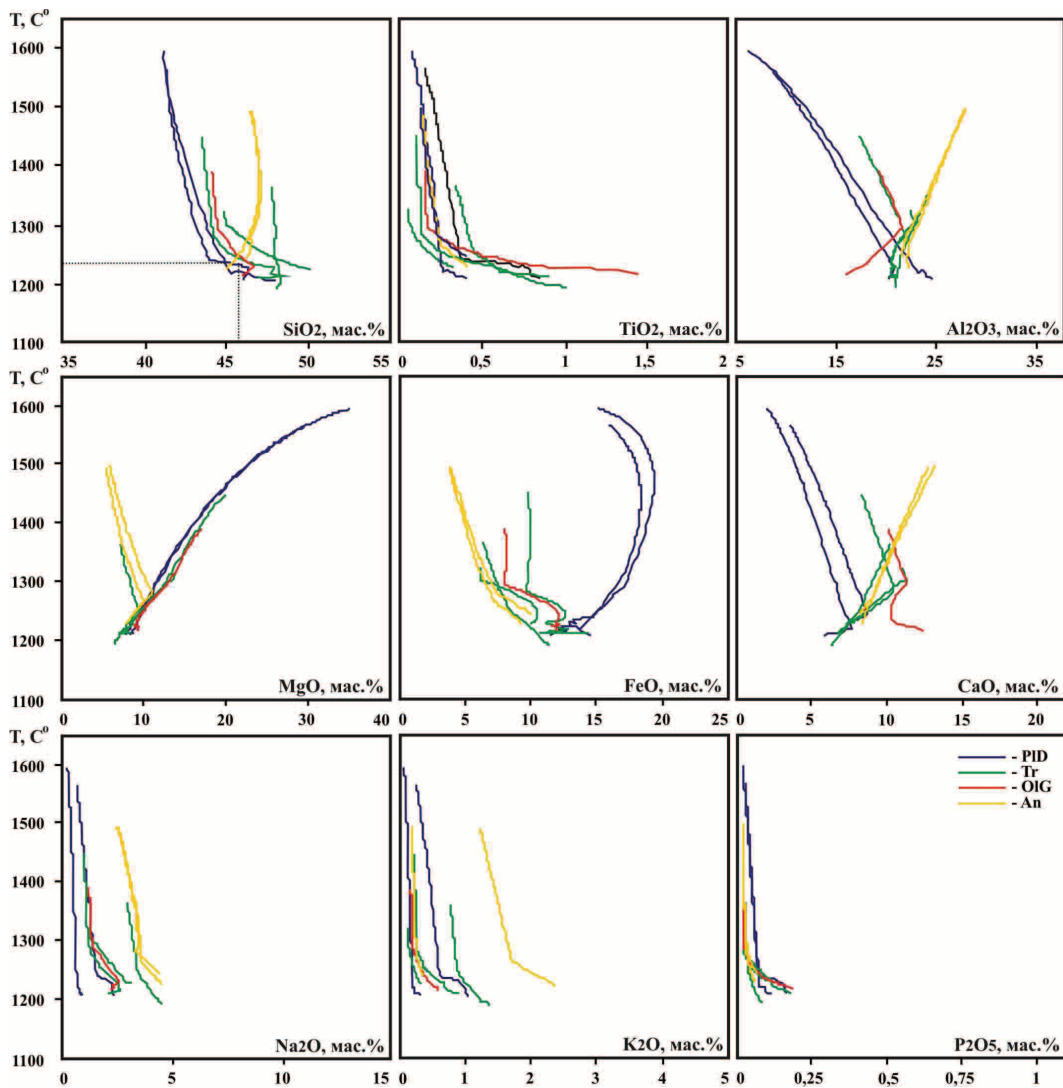


Рис. 3. Графики моделирования равновесной кристаллизации по программе КОМАГМАТ-3.52 [11] для главных разновидностей интрузивных пород Талажинского массива: PID – плагиодунит; Tr – троктолит; OIG – оливиновое габбро; An – анортозит

Оценка геодинамической обстановки

Породы рассматриваемого массива, очевидно, являются комагматичными образованиями с островодужными высокоглиноземистыми базальтами. Данное утверждение подтверждается сравнением поля мультиэлементных спектров его пород с усредненным спектром толеитовых базальтов островных дуг (IAB) (рис. 4). Ранее синхронность расслоенных низкотитанистых высокоглиноземистых перидотит-троктолит-габбровых массивов и островодужных вулканитов на примере некоторых районов Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) доказана А.Э. Изохом с соавторами [13]. Они установили приуроченность интрузивов данного формационного типа к осевым частям островодужных систем.

Преобладание в составе расслоенной серии пород талажинского комплекса троктолитов, при-

сутствие линз и прослоев анортозитов с высокой основностью плагиоклаза (An_{75-99}), постоянное присутствие в ультрамафитах плагиоклаза (до 15 %) также свидетельствуют в пользу формирования массива в обстановке островной дуги [13]. Помимо этого, габброиды комплекса по минералогическим особенностям и химизму близки алливалитовым и эвкритовым включениям в современных островодужных вулканитах [16].

Использование диаграмм $Zr/Nb-Tb/Th$ и $Nb/Y-Zr/Y$, рис. 5, предложенных К. Конди [17], позволяет также смоделировать геодинамическую обстановку кристаллизации интрузивов Талажинского комплекса и предположить возможный источник вещества, из которого произошло зарождение родоначального расплава. На диаграмме $Nb/Y-Zr/Y$ фигуративные точки составов пород Талажинского массива попадают в поле базальтов

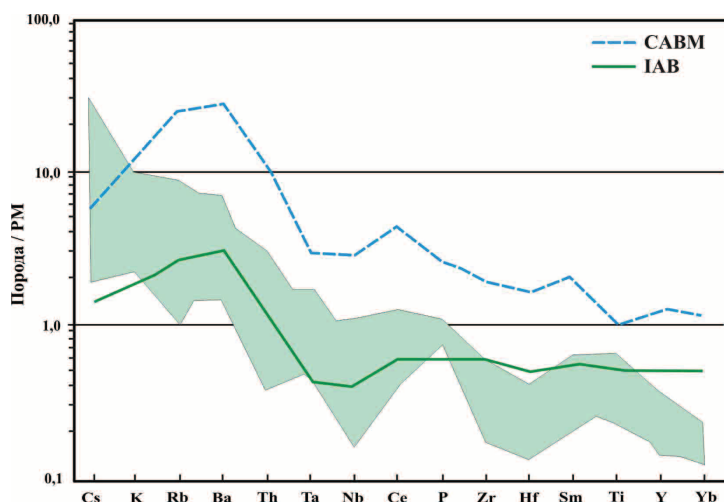


Рис. 4. Поле мультиэлементных спектров для пород Талажинского массива, нормированных по примитивной мантии (РМ) [14]. Для сравнения показаны усредненные спектры толеитовых базальтов островных дуг (IAB) и известково-щелочных базальтов активных континентальных окраин (CABM) [15]

океанического плато и изначально близки примитивной мантии. В их ориентации отчетливо отмечается влияние на исходное вещество источника субдукционных флюидов. На второй диаграмме Zr/Nb – Tb/Th фигуративные точки составов формируют достаточно компактный рой в области островодужных базальтов, что хорошо согласуется с ранее сделанными нами предположениями. При этом составы пород близки к компонентно обогащенному расплаву (рис. 5).

Полученные результаты позволяют предположить следующий сценарий генерации и эволюции магматического расплава (рис. 6). Исходным веществом для зарождения родоначального расплава явились, очевидно, толеитовые базальты океаниче-

ского плато, близкие по составу примитивной мантии. При поглощении океанической коры с плато в зоне субдукции (часть плато могло быть срезано и включено в состав аккреционного клина) с ней произошли весьма значительные изменения. Очевидно, она была расплавлена и переработана, после чего в качестве магматического расплава устремилась по ослабленным зонам к поверхности земной коры. Дальнейшее компонентное обогащение родоначального расплава Талажинского интрузива в процессе его перемещения к магматической камере очевидно связано с контаминацией материалом вмещающих пород. В пользу последнего предположения служат высокие нормативные содержания типичных коровых элементов – Ba, Sr, Pb, в породах Талажинского

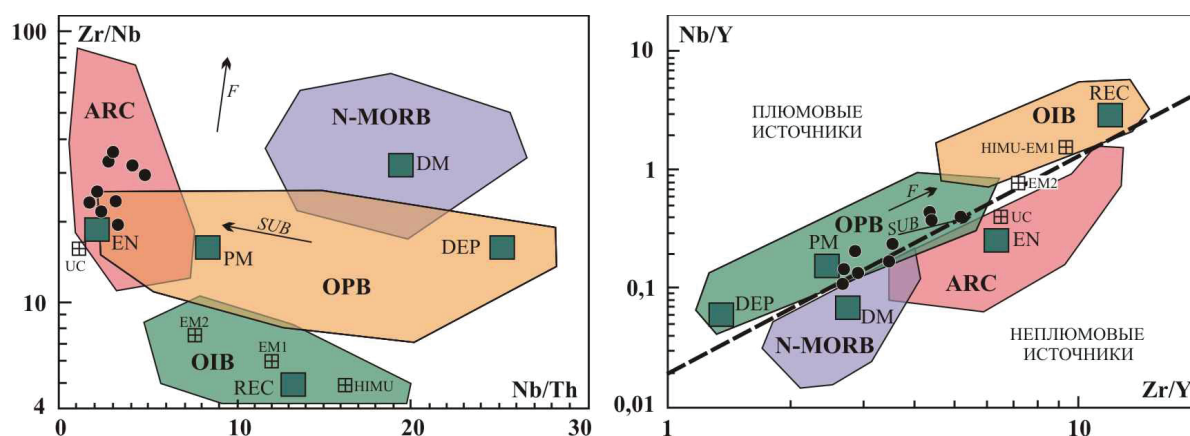


Рис. 5. Положение составов пород Талажинского массива (черные кружки) на диаграммах Zr/Nb – Tb/Th и Nb/Y – Zr/Y [17]: UC – верхняя континентальная кора; PM – примитивная мантия; DEP – глубинная деплетированная мантия; REC – рециклированный компонент; EN – обогащенный компонент; HIMU – источник с высоким отношением U/Pb; EM1 и EM2 – обогащенные мантийные источники; ARC – островодужные базальты; N-MORB – базальты срединно-океанических хребтов; OIB – базальты океанических островов; OPB – базальты океанических плато. Стрелками показаны эффекты парциального плавления (F) и влияния субдукционных флюидов (SUB). Утолщенная штриховая линия на диаграмме – вероятная граница, разделяющая плюмовые и неплюмовые источники

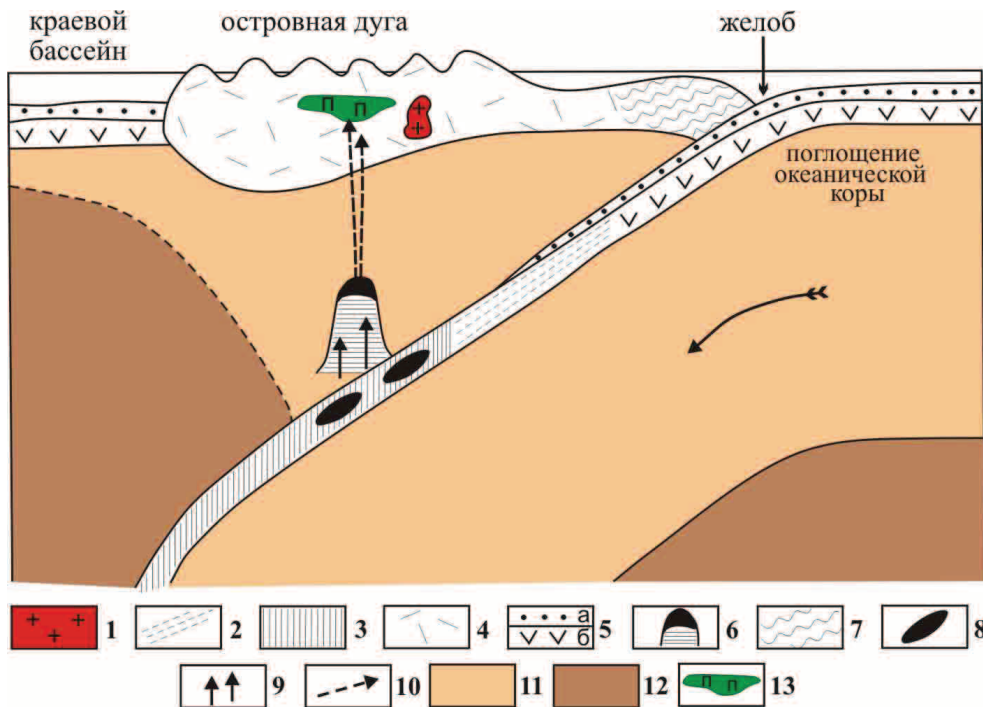


Рис. 6. Гипотетическая модель механизма формирования расслоенных интрузивов талажинского комплекса (составлена с использованием [12, 18, 19]): 1 – гранитоиды; 2 – породы амфиболитовой фации метаморфизма в океанской коре; 3 – породы эклогитовой фации метаморфизма в океанской коре; 4 – кора островной дуги; 5 – океанская кора: а – осадки, б – толеитовые базальты океанического плато; 6 – мантийный диапир с зоной магнезиализации; 7 – зона интенсивного сжатия, складчатости, надвигообразования; 8 – области магнезиализации; 9 – зона воздействия водного флюида; 10 – гипотетический путь перемещения магмы; 11 – литосферная мантия; 12 – астеносферная мантия; 13 – расслоенный мафит-ультрамафитовый интрузив

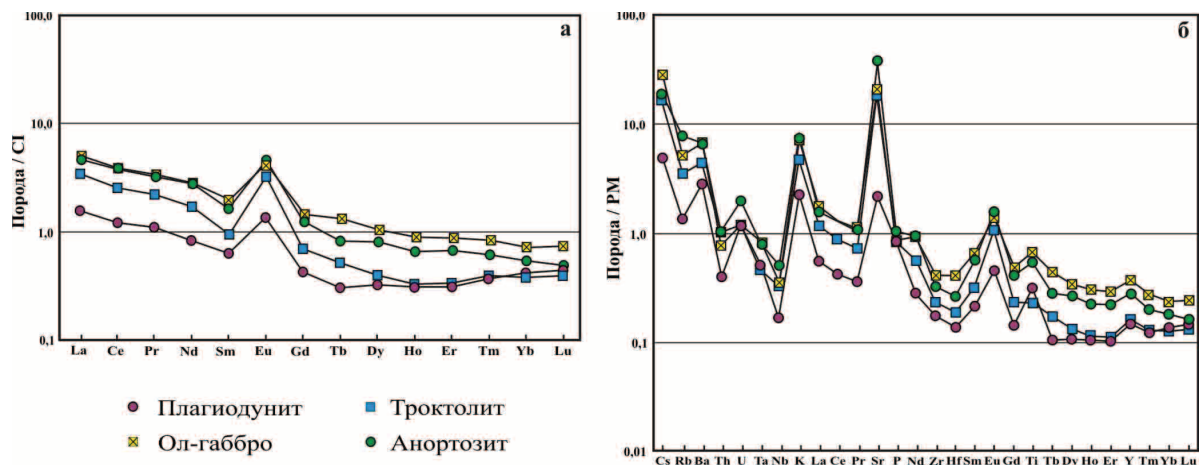


Рис. 7. Мультиэлементные спектры для пород Талажинского массива, нормированные по углестому хондриту C1 [22] (а) и примитивной мантии [14] (б)

массива (рис. 7). Ранее явления взаимодействия магмы с породами коры, способствующие обогащению этими элементами доказаны на основании изотопно-геохимических данных [20, 21] для Йоко-Довыренского и Войсис-Бей интрузивов, которые близки по формационной принадлежности к рассматриваемому массиву.

Выводы

Таким образом, петрологические особенности Талажинского интрузива позволяют рассматривать его как ритмично-расслоенный (очевидно – двухфазный) плагиндунит-троктолит-габбро-анортозитовый массив. Петрогеохимические особенности слагающих его пород хорошо согласуются с результатами моделирования родоначального расплава и отража-

ют образование массива в результате кристаллизационной дифференциации высокоглиноземистого оливин-базальтового расплава, для которого характерны повышенная магнезиальность при низких концентрациях HFSE (Ti, Zr, REE), слабая обогащенность LREE, положительная Eu-аномалия (таблица, рис. 7). В мультиэлементных спектрах проявлены отчетливые Ta–Nb-минимумы и Ba–Sr-максимумы. Эти данные позволяют предполагать, что формирование очагов исходных расплавов происхо-

дило за счет толеитовых базальтов океанического плато при их поглощении и дальнейшего плавления в зоне субдукции. Дальнейшая эволюция расплава обусловлена процессами его перемещения в магматическую камеру, которые сопровождались контаминацией пород континентальной коры.

Авторы выражают признательность д.г.-м.н., профессору МГУ, ведущему сотруднику ГЕОХИ РАН (г. Москва) А.А. Арискину за консультации по аспектам моделирования исходных расплавов по программе КОМАГМАТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышов А.И., Ножкин А.Д., Мишенина М.А. Петрохимическая типизация ультрамафитов Канского блока (Восточный Саян) // Геохимия. – 2010. – № 2. – С. 1–25.
2. Чернышов А.И., Юричев А.Н. Петрология и потенциальная рудоносность мафит-ультрамафитовых массивов талажинского и кулибинского комплексов Восточного Саяна. – Томск: ЦНТИ, 2012. – 131 с.
3. Юричев А.Н., Чернышов А.И. Рудная минерализация идарского дунит-гарцбургитового комплекса (Северо-Запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 69–75.
4. Юричев А.Н. Мафит-ультрамафитовый магматизм Канской глыбы и его рудный потенциал, Северо-Запад Восточного Саяна // Руды и металлы. – 2013. – № 3. – С. 11–20.
5. Юричев А.Н., Чернышов А.И. Рудная минерализация перидотитов и габброидов кулибинского комплекса (северо-запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 64–70.
6. Юричев А.Н., Чернышов А.И., Конников Э.Г. Талажинский плагиодунит-троктолит-анортозит-габбровый массив Восточного Саяна: петрохимические особенности и проблемы рудоносности // Геология и геофизика. – 2013. – № 2. – С. 219–236.
7. Глазунов О.М., Богнибов В.И., Еханий А.Г. Кингашское платиноидно-медно-никелевое месторождение. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2003. – 192 с.
8. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names / B.E. Leake, A.R. Woolley, C.E.-S. Arps, W.D. Birch, M.Ch. Gilbert, J.D. Grice, F.C. Hawthorne, A. Kato, H.J. Kisch, V.G. Krivovichev, K. Linthout, J. Laird, J.A. Mandarino, W.V. Maresch, E.H. Nickel, N.M.-S. Rock, J.C. Schumacher, D.C. Smith, N.C.-N. Stephenson, L. Ungaretti, E.J.-W. Whittaker // Canadian Mineralogist. – 1997. – V. 35. – P. 219–246.
9. Динамика внутрикамерной дифференциации базитовых магм / М.Я. Френкель, А.А. Ярошевский, А.А. Арискин, Г.С. Бармина, Е.В. Коптев-Дворников, Б.С. Киреев. – М.: Наука, 1988. – 216 с.
10. Арискин А.А. Геохимическая термометрия пород расслоенной серии Скергаардского интрузива // Петрология. – 2002. – Т. 10. – № 6. – С. 563–568.
11. Арискин А.А., Бармина Г.С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. – М.: Наука, 2000. – 363 с.
12. Богатилов О.А., Коваленко В.И., Шарков Е.В. Магматизм, тектоника, геодинамика Земли. – М.: Наука, 2010. – 606 с.
13. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes / eds. A.D. Saunders, M.J. Norry / Magmatism in the oceanic basins // Geol. Soc. Spec. Publ. – 1989. – № 42. – P. 313–345.
14. Condie K. Plate tectonics and crustal evolution. – N.Y.: Pergamon Press Inc., 1989. – 288 p.
15. Высокоглиноземистые расслоенные габброиды Центрально-Азиатского складчатого пояса (геохимические особенности, возраст и геодинамические условия формирования) / А.Э. Изох, Г.В. Поляков, А.С. Гибшер, П.А. Балыкин, Д.З. Журавлев, В.А. Пархоменко // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39. – № 11. – С. 1565–1577.
16. Современные задачи петрологии и геодинамики в развитии концепции рационального природопользования: материалы школы семинара / под ред. И.Ф. Гертнер, П.А. Тишина. – Томск: ЦНТИ, 2006. – 160 с.
17. Condie K. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // Lithos. – 2005. – V. 79. – P. 491–504.
18. Авдейко Г.П., Палуева А.А., Хлебородова О.А. Геодинамические условия вулканизма и магнообразования Курило-Камчатской островодужной системы // Петрология. – 2006. – Т. 14. – № 3. – С. 248–266.
19. Добрецов Н.Л. Петрологические, геохимические и геодинамические особенности субдукционного магматизма // Петрология. – 2010. – Т. 18. – № 1. – С. 88–110.
20. Конников Э.Г. Дифференцированные гипербазит-базитовые комплексы докембрия Забайкалья. – Новосибирск: Наука, 1986. – 224 с.
21. Налдретт А.Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометаллических руд. – СПб.: СПбГУ, 2003. – 488 с.
22. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1989. – V. 53. – P. 197–214.

Поступила 30.10.2013 г.

UDC 552.321.5, 6

PARENTAL MELT AND GEODYNAMICS OF THE LAYERED MAFIC-ULTRAMAFIC MASSIFS OF THE KAN BLOCK OF EASTERN SAYAN

Alexey N. Yurichev,

Cand. Sc., Tomsk State University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 36. E-mail: juratur@sibmail.com.

Alexey I. Chernyshov,

Dr. Sc., Tomsk State University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 36. E-mail: aich@ggf.tsu.ru.

Based on the results of simulation of equilibrium crystallization by the program COMAGMAT 3.52 the authors have evaluated the probable temperatures and chemical composition of the parent magma of Talazhinsky mafic-ultramafic massif Kan block (north-western part of Eastern Sayan). The paper introduces for the first time the model of geodynamic conditions for crystallizing the layered series of its rocks. The data obtained allow making the conclusion on the fact that intrusive body is the rhythmically layered plagioclinit-troctolite-gabbro-anorthosite massif, which was formed at crystallization differentiation of low-Ti high-alumina olivine-basalt melt; the latter is characterized by high concentrations of Mg at low HFSE, weak enrichment of LREE, positive Eu-anomaly. The initial melt sources were formed owing to tholeiitic basalts of oceanic plateau at their absorption and further melting in a subduction zone. The subsequent evolution of the melt occurred due to the processes of its movement into magma chamber, which was accompanied by contamination of continental crust rocks.

Key words:

Talazhinsky massif, layered complex, mafites, ultramafites, modeling, parental melt, geodynamics.

REFERENCES

- Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Mishenina M.A. Petrokhimicheskaya tipizatsiya ultramafitov Kanskogo bloka (Vostochny Sayan) [Petrogeochemical typification of the ultramafic rocks from the Idar greenstone belt, Kan block, East Sayan]. *Geochemistry International*, 2010, no. 2, pp. 1–25.
- Chernyshov A.I., Yurichev A.N. *Petrologiya i potentsialnaya rudonosnost mafit-ultramafitovykh massivov talazhinskogo i kulibinskogo kompleksov Vostochnogo Sayana* [Petrology and potential ore content of mafic-ultramafic massifs of talazhinsky and kulibinsky complexes of Eastern Sayan]. Tomsk, CNTI, 2012. 131 p.
- Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Rudnaya mineralizatsiya idarskogo dunit-garzburgitovogo kompleksa (Severo-Zapad Vostochnogo Sayana) [Ore mineralization of the Idarsky dunite-harzburgite complex (North-west Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 69–75.
- Yurichev A.N. Mafit-ultramafitovy magmatizm Kanskoy glyby i ego rudny potentsial, Severo-Zapad Vostochnogo Sayana [Mafic-ultramafic magmatism of Kan block and its ore potential, North-west Eastern Sayan]. *Rudy i metally*, 2013, no. 3, pp. 11–20.
- Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Rudnaya mineralizatsiya peridotitov i gabbroidov kulibinskogo kompleksa (severo-zapad Vostochnogo Sayana) [Ore mineralization of peridotites and gabbros of the Kulibinsky complex (North-west of the Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 64–70.
- Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Konnikov E.G. Talazhinskiy plagioclinit-troktolit-anortozit-gabbrovyy massiv Vostochnogo Sayana: petrogeokhimicheskie osobennosti i problemy rudonosnosti [The Talazhin plagioclinit-troctolite-anorthosite-gabbro massif (East Sayan): petrogeochemistry and ore potential]. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 2, pp. 219–236.
- Glazunov O.M., Bognibov V.I., Ekhanin A.G. *Kingashskoe platino-medno-nikelevoe mestorozhdenie* [Kingashsky PGE-copper-nickel deposit]. Irkutsk, IGTU Publ., 2003. 192 p.
- Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.-S., Birch W.D., Gilbert M.Ch., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Mandarino J.A., Marresch W.V., Nickel E.H., Rock N.M.-S., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.-N., Ungaretti L., Whittaker E.J.-W. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *Canadian Mineralogist*, 1997, vol. 35, pp. 219–246.
- Frenkel M.Ya., Yaroshevskiy A.A., Ariskin A.A., Barmina G.S., Koptev-Dvornikov E.V., Kireev B.S. *Dinamika vnutrikamernoy differentsiatsii bazitovykh magm* [Dynamics of intrachamber differentiation of basic magmas]. Moscow, Nauka, 1988. 216 p.
- Ariskin A.A. Geokhimicheskaya termometriya porod rassloennoy serii Skergaardskogo intruziva [Geochemical thermometry of the layered series rocks of the Skaergaard intrusion]. *Petrology*, 2002, vol. 10, no. 6, pp. 563–568.
- Ariskin A.A., Barmina G.S. Modelirovanie fazovykh ravновесий pri kristallizatsii bazaltovykh magm [Modelling of phase equilibria in the crystallization of basaltic magmas]. Moscow, Nauka, 2000. 363 p.
- Bogatikov O.A., Kovalenko V.I., Sharkov E.V. *Magmatizm, tektonika, geodinamika Zemli* [Magmatism, tectonics, geodynamics of the Earth]. Moscow, Nauka, 2010. 606 p.
- Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes / Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. *Magmatism in the oceanic basins. Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1989, no. 42, pp. 313–345.
- Condie K. *Plate tectonics and crustal evolution*. N.Y., Pergamon Press Inc., 1989. 288 p.
- Izokh A.E., Polyakov G.V., Gibsher A.S., Balykin P.A., Zhuravlev D.Z., Parkhomenko V.A. Vysokoglinozemistye rassloennyye gabbroidy Tsentralno-Aziatskogo skladchatogo poyasa (geokhimicheskie osobennosti, vozrast i geodinamicheskie usloviya formirovaniya) [The high-alumina foliated gabbroides of Central Asian Fold Belt (geochemical characteristics, age and geodynamic conditions of formation)]. *Russian Geology and Geophysics*, 1998, vol. 39, no. 11, pp. 1565–1577.
- Sovremennyye zadachi petrologii i geodinamiki v razvitiy kontseptsii ratsionalnogo prirodoispolzovaniya [Modern problems of petrology and geodynamics in the development of the concept of

- environmental management]. *Materialy shkoly-seminara* [Material of the seminar]. Ed. by Gertner I.F., Tishin P.A. Tomsk, CNTI Publ., 2006. 160 p.
17. Condie K. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? *Lithos*, 2005, vol. 79, pp. 491–504.
 18. Avdeyko G.P., Palueva A.A., Khleborodova O.A. Geodinamicheskie usloviya vulkanizma i magmoobrazovaniya Kurilo-Kamchat-skoy ostrovoduzhnoy sistemy [Geodynamic conditions of volcanism and magma formation in the Kurile-Kamchatka island-arc system]. *Petrology*, 2006, vol. 14, no. 3, pp. 248–266.
 19. Dobretsov N.L. Petrologicheskie, geokhimicheskie i geodinamicheskie osobennosti subduksionnogo magmatizma [Distinctive petrological, geochemical, and geodynamic features of subduction-related magmatism]. *Petrology*, 2010, vol. 18, no. 1, pp. 88–110.
 20. Konnikov E.G. *Differentsirovannyye giperbazit-bazitovyye komplekсы dokembriya Zabaykalya* [Mafic-ultramafic differentiated complexes of Precambrian Transbaikalia]. Novosibirsk, Nauka, 1986. 224 p.
 21. Naldrett A.J. *Magmaticheskie sulfidnye mestorozhdeniya medno-nikelevykh i platinometalnykh rud* [Magmatic sulfide deposits of copper-nickel and PGE ore]. Saint-Petersburg, SPbGU, 2003. 488 p.
 22. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1989, vol. 53, pp. 97–214.

УДК 552.578.2.061.4

ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ЦЕОЛИТОВ И ВЛИЯНИЕ ИХ НАЛИЧИЯ НА РАЗРАБОТКУ ПРОДУКТИВНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МЕССОЯХСКОЙ ГРУППЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Поднебесных Александр Владимирович,

канд. геол.-минерал. наук, начальник отдела подсчета запасов УВ

Управления геологии и разработки месторождений «Ямал»

ООО «Газпромнефть НТЦ», Россия, 625626, г. Тюмень, ул. Республики, 143А.

E-mail: Podnebesnikh.AV@gazpromneft-ntc.ru

Овчинников Василий Павлович,

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Бурение нефтяных

и газовых скважин» Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского

государственного нефтегазового университета, Россия, 625000, г. Тюмень,

ул. Володарского, д. 38. E-mail: burenie@rambler.ru

Установлено, что цеолиты образуются в щелочных условиях среды в процессе диагенеза или катагенеза и снижают фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов. Показано, что содержание цеолитов в породах-коллекторах напрямую связано со значением пористости и может достигать 13 % от общего объема породы. Определение зон цеолитизации методами ГИС довольно затруднительно, поэтому при выявлении таких интервалов по данным анализа кернового материала необходимо вводить поправки на возможное содержание в них цеолитов. Определено, что процесс цеолитизации на Мессояхской группе месторождений приурочен к определенным стратиграфическим интервалам, а именно к суходудинской свите нижнего мела. В региональном масштабе цеолитизированные породы четко привязаны к зонам региональных разломов и зонам с максимальной метасоматической проработкой вмещающих пород. Опираясь на керновые данные и данные каротажа, была уточнена существующая седиментологическая модель продуктивных пластов Мессояхской группы месторождений, обозначены наиболее благоприятные условия и временные интервалы для формирования цеолитов. Кроме того, на основе опыта разработки месторождений с высоким содержанием цеолитов предложен способ наилучшей обработки призабойной зоны, который оказывает прямое влияние на увеличение коэффициента извлечения нефти.

Ключевые слова:

Цеолиты, метасоматоз, фильтрационно-емкостные свойства, ломонтит, фациальная модель, коэффициент извлечения нефти, призабойная зона, Мессояхская группа месторождений.

Введение

В настоящее время в эксплуатацию вводится все большее количество месторождений нефти и газа, которые имеют очень сложное геологическое строение. Одним из наиболее ярких примеров объектов такого типа является Мессояхская группа месторождений, которая по запасам нефти и газа относится к уникальным геологическим объектам. В разрезе осадочной толщи, вскрытой пробуренными поисковыми и разведочными скважина-

ми, выделяются породы мезозойской и кайнозойской групп. Продуктивные пласты встречаются в разрезе, мощность которого более двух километров, и стратиграфически приурочены к отложениям суходудинской, малохетской и покурской свит. Такой большой этаж нефтеносности обуславливает и разные свойства нефти: например, для коллекторов суходудинской свиты характерны «легкие» нефти с вязкостью от 8 до 15 мПа·с, а для отложений покурской свиты свойственны «тя-

желые» нефти с вязкостью более 100 мПа*с. Кроме того, в разрезе встречаются и вторичные изменения пород коллекторов, которые могут оказывать значительное влияние на разработку всего месторождения. Одним из таких процессов является цеолитизация, которая оказывает влияние не только на коллекторские свойства продуктивных пластов, но и на разработку месторождения.

Тектоническое строение района

Мессояхская группа месторождений расположена в пределах субрегиональной структуры Мессояхской гряды, в центральной ее части, в своде структуры II порядка – Среднемессояхского вала, и приурочена к одноименным поднятиям (рис. 1). Среднемессояхский вал занимает центральное положение на Мессояхской гряде. Имеет протяженность около 140 км при ширине 25–40 км, амплитуду от 360 до 1170 м. В истории геологического развития вал трижды подвергался существенным структурным перестройкам: нижнего–среднего триаса (Суракайская фаза герцинской эрогенической эры); верхней юры – нижнего мела, киммеридж–валанжина (Новокиммерийская фаза киммерийской эпохи) и верхнего мела – нижнего палеогена (Ларамийская фаза альпийской эпохи).

На первом этапе вал представлял крупную субширотную ассиметричную, дугообразную структуру, выпуклую на юг, с крупным поперечным субмеридиональным поднятием в южной ее части. К западу поднятие переходило в сильно удлинённый структурный нос, погружающийся на северо-запад (современное положение Западно-Мессояхского поднятия). Восточный склон поднятия был осложнен крупной секущей под углом 45° к простиранию субмеридиональной зоной прогиба грабенообразного типа (современное положение Восточно-Мессояхского грабена), разделяющей вал на два линейных гребнеобразных поднятия северо-восточного простирания (южное и северное современное положение Маломессояхского и Верхнемессояхского поднятий). Восточная граница грабеновой зоны являлась также границей между Среднемессояхским валом и Усть-Портовским межавалом. Помимо зоны прогиба, вал на всем протяжении осложнен поперечными разломами сбросового типа. В среднем триасе вал был полностью перекрыт покровными осадочными горизонтами. Период захоронения вала сопровождался образованием большого количества неантиклинальных ловушек на его склонах.

На отрезке времени от среднего триаса до конца поздней юры структурный облик изменился в сторону относительно правильной линейно-вытянутой однокупольной структуры с пологими западным и восточным погружением и крутыми южным и северным склонами. Структурно, как двухкупольное поднятие, Среднемессояхский вал начал оформляться с конца поздней юры. Проявление дизъюнктивной тектоники в этот период было ми-

нимальным и ограничено проявлением ряда малоамплитудных разломов на западном и восточном погружениях вала. В начале второго этапа, в конце поздней юры на западе вала начался рост и обособление Западно-Мессояхского поднятия при относительном отставании роста Восточно-Мессояхского поднятия [1].

В завершающей части этапа, на границе поздней юры и раннего мела, Западно- и Восточно-Мессояхское поднятия оформились как самостоятельные структуры, возвышающиеся над уровнем моря. Этот отрезок времени характеризуется преобладанием пликативных структур. Разрывные дислокации развиты слабо, имеют малоамплитудный характер, ориентированы как вдоль, так и вкрест простирания вала. Вал в это время являлся естественной границей между южной, Большехетской, и северной, Антипаютинской, зонами седиментации, что привело к фациальному различию в формировании разновозрастных разрезов в северной и южной зонах и широкому формированию структурно-литологических ловушек. В среднем валанжине вал вторично перекрыт осадочными отложениями, в палеоландшафтах он продолжал выделяться возвышенностью, в результате чего мощность перекрывающих отложений над ним сокращена.

В конце сеномана – начале палеогена, в альпийскую эпоху, Среднемессояхский вал в третий раз испытал поднятие. В этот этап широко проявились как плитквативные (на склонах), так и дизъюнктивные (в своде) дислокации, и вал приобрел современный структурный облик. В сводовой части вала сформированы горст-грабеновые структуры. Наиболее контрастно строение горст-грабеновых структур отражено по поверхности сеномана. В пределах Западно-Мессояхского поднятия их семь, Восточно-Мессояхского – пять [1].

Горст-грабеновые структуры имеют субмеридиональное простирание, по отношению к валу коссекущие, в районе Восточно-Мессояхского поднятия они имеют С–СВ простирание, в районе Западно-Мессояхского – С–СЗ. Грабеновые структуры ограничены зонами дезинтеграции, состоящими из серий сближенных разломов, круто наклоненных к центру структуры. С глубиной они сближаются с образованием «корневых» разломов сбросового характера [2].

Пики образования ловушек различного типа приходятся на завершающие отрезки проявления тектонических этапов. С этими этапами связано формирование залежей УВ. Установлено, что нефтегазовые, нефтегазоконденсатные и газовые залежи локализованы в ловушках, образованных во второй и третий этапы. Вероятно, следует ожидать образование залежей углеводородов и в ловушках первого этапа. Образование тектонически экранированных залежей углеводородов произошло в третий этап за счет частичного переформирования залежей углеводородов первого и второго этапов.

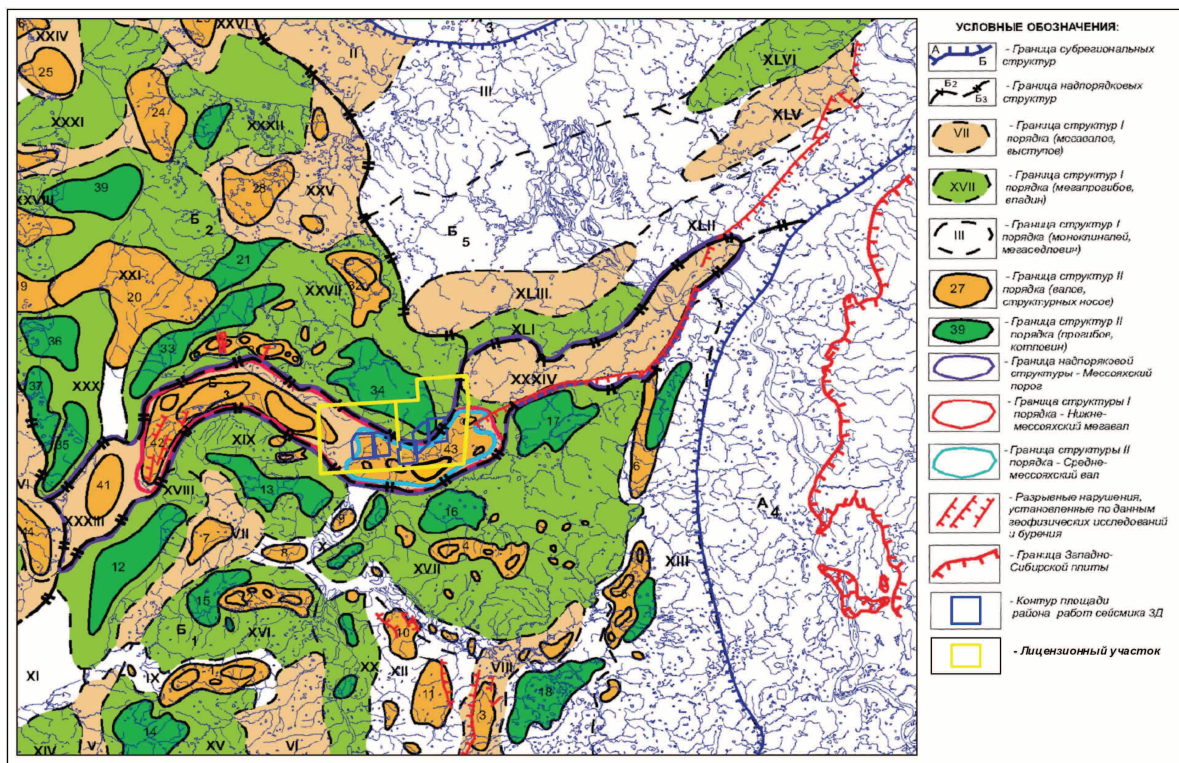


Рис. 1. Выкопировка из тектонической карты мезозойско-кайнозойского ортоплатформенного чехла севера Западно-Сибирской плиты (Нестеров, 1984, с дополнениями). Условные обозначения к рис. 1. Структуры субрегиональные и надпорядковые: A₁ – Припайхойская гемиантеклиза, A₂ – Приуральская моноклиза, A₃ – Притаймырская гемиантеклиза, A₄ – Приенисейская моноклиза, B – Ямало-Тазовская мегасинеклиза, B₁ – Надым-Тазовская синеклиза, B₂ – Ямало-Гыданская синеклиза, B₃ – Мессояхская гряда, B₄ – Западно-Ямальская структурная ступень, B₅ – Енисей-Хатангский желоб; Структуры I порядка: I – Щучинский выступ, II – Юрацкий выступ, III – Среднеясинская моноклиналь, IV – Ярудейский мегавал, V – Медвежий мегавал, VI – Уренгойский мегавал, VII – Ямбургский мегавал, VIII – Русско-Часельский мегавал, IX – Песцовая мегаседловина, X – Юрхарово-Находкинская мегаседловина, XI – Северо-Ныдинская моноклиналь, XII – Хадырьяхинская моноклиналь, XIII – Сидоровско-Сузунская моноклиналь, XIV – Нижненадымская впадина, XV – Нерутинская впадина, XVI – Хадуттейская впадина, XVII – Большехетская впадина, XVIII – Парусный мегапрогиб, XIX – Лымберасейский мегапрогиб, XX – Нижнепурский мегапрогиб, XXI – Геофизический мегавал, XXII – Центрально-Ямальский мегавал, XXIII – Северо-Ямальский мегавал, XXIV – Среднеямальский свод, XXV – Гыданский гемиасвод, XXVI – Явайский гемиасвод, XXVII – Антипаютинская впадина, XXVIII – Северо-Сеяхинская впадина, XXIX – Тиутейская впадина, XXX – Сеяхинский мегапрогиб, XXXI – Ханарсалинский мегапрогиб, XXXII – Тадибеяхинский мегапрогиб, XXXIII – Нижнемессояхский мегавал, XXXIV – Усть-Портковский мегавал, XXXV – Нурминский мегавал, XXXVI – Южно-Ямальский мегавал, XXXVII – Юрибийская моноклиналь, XXXVIII – Верхнепояхтинская мегаседловина, XXXIX – Яротинский мегапрогиб, XL – Нерутяхинский мегапрогиб, XLI – Южно-Паютинский мегапрогиб, XLII – Пясинская моноклиналь, XLIII – Танамский мегавал, XLIV – Устьенисейская впадина, XLV – Рассохинский мегавал, XLVI – Аганский мегапрогиб; Структуры II порядка: 1 – Песцовый вал, 2 – Оликуминский вал, 3 – Русский вал, 4 – Пяяхинский вал, 5 – Тагульский вал, 6 – Сузунский вал, 7 – Ямбургское КП, 8 – Юрхаровское КП, 9 – Находкинское КП, 10 – Тазовское КП, 11 – Заполярное КП, 12 – Парусовый прогиб, 13 – Лымберасейский прогиб, 14 – Среднеясинская котловина, 15 – Западно-Оликуминская котловина, 16 – Верхнеиндикьяхинская котловина, 17 – Сякутояхинская котловина, 18 – Южно-Рускореченская котловина, 19 – Восточно-Арктический структурный нос, 20 – Геофизическое КП, 21 – Южно-Гыданский структурный нос, 22 – Восточно-Бованенковский вал, 23 – Северо-Сеяхинский вал, 24 – Пэкседовское КП, 25 – Южно-Тамбейское КП, 26 – Западно-Тамбейское КП, 27 – Северо-Тамбейское КП, 28 – Гыданское КП, 29 – Южно-Явайское КП, 30 – Штормовое КП, 31 – Тотояхинский вал, 32 – Северо-Танамское КП, 33 – Чугорьяхинский прогиб, 34 – Вркутояхинский прогиб, 35 – Восточно-Нурминский прогиб, 36 – Яптиксалинский прогиб, 37 – Нижнепурмояхинский структурный нос, 38 – Болынетамботинский прогиб, 39 – Беломысский прогиб, 40 – Восточно-Бованенковский незамкнутый вал, 41 – Мыскаменное КП, 42 – Адерпаютинский вал, 43 – Среднемессояхский вал, 44 – Новопортковский вал, 45 – Сабьяхинский вал, 46 – Арктический вал, 47 – Яротинская котловина

Фациальная модель отложений суходудинской свиты

Во вскрытом разрезе осадочного чехла Среднемессояхского вала выделяется восемь нефтегазовых комплексов: нижнеюрский, среднеюрский, верхнеюрский, нижнеенекомский, верхнеенеком-

ский, аптский, альб-сеноманский, турон-коньякский, которые формировались в различных фациальных обстановках, что существенно отразилось на геологическом строении района. Согласно нашим представлениям, нижняя часть суходудинской свиты формировалась преимущественно в от-

носителю глубоководных условиях, при активном прогибании палеокотловины бассейна, что привело к формированию клиноформного комплекса, характерного для неокотловинных отложений Западной Сибири.

На основе изучения кернового материала и данных каротажа скважин, пробуренных в 2011–2012 гг., была уточнена седиментологическая модель формирования продуктивных пластов сухоудинской свиты Мессояхской группы месторождений. Отложения сухоудинской свиты формировались в основном в условиях мелководного шельфа и дельтового комплекса. В разрезе свиты выделяются фации дистального берегового склона, проделты, фронта дельты, дистальной части дельты (рис. 2). Во время накопления продуктивных осадков пластов БУ_{16–20} отмечается небольшое обмеление бассейна осадконакопления на фоне некоторой тектонической активности района месторождений. Это способствует интенсивной проградации дельтового комплекса вглубь бассейна и формированию фаций дистального берегового склона, фронта дельты, дельтовых каналов, проксимальной части дельты и проксимального берегового склона [3].

Отложения пластов БУ_{13–15} формируются на границе фациальных обстановок – морской и кон-

тинентальной. Пласты начинали формироваться на фоне некоторого погружения мелководного бассейна, затем прослеживается небольшая регрессия, в результате чего происходит проградация морской дельты вглубь берегового склона в юго-западном направлении, а на самом востоке Мессояхской группы месторождений формируются отложения надводной части дельты. При исследовании керна из данного стратиграфического интервала в ряде скважин был выявлен не типичный для осадочных терригенных отложений Западной Сибири цемент. Здесь наряду с традиционными минералами – каолинитом, гидрослюда, хлоритом, кальцитом – в его составе отмечаются цеолиты. Кроме этого, нам удалось привязать зоны с максимальным развитием цеолитизации к определенному набору фаций, характерных для данного стратиграфического интервала. Таким набором являются фации проксимального фронта дельты и проксимального берегового склона.

Фация проксимального фронта дельты характеризуется более песчаным составом пород и представлена песчаниками тонкозернистыми с тонкими прослоями алевролита глинистого. Цемент в песчанике карбонатно-глинистый, карбонатный, редко глинистый. Характерны текстуры штормо-

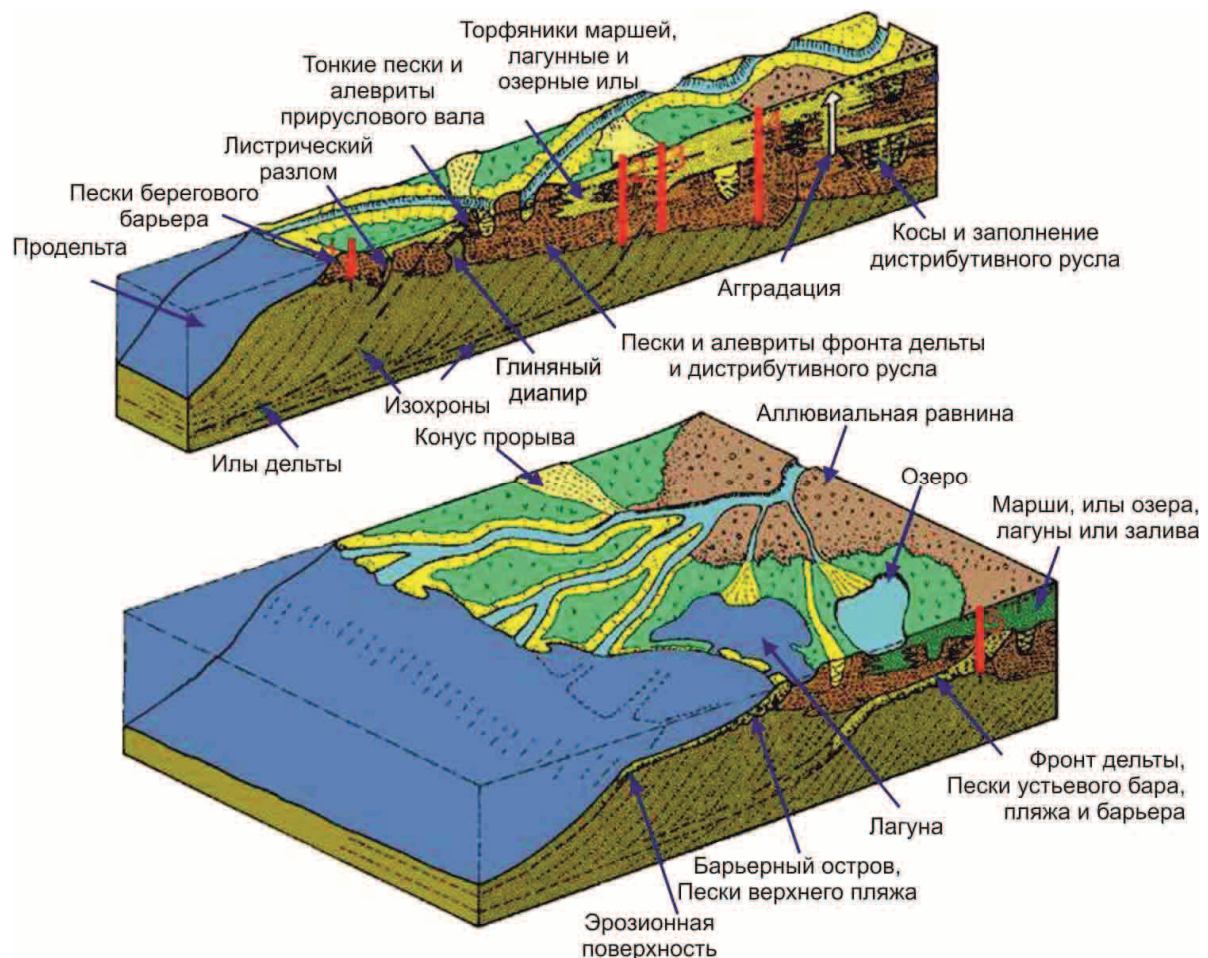


Рис. 2. Седиментологическая модель классической дельты (Einsele, 2000, с изменениями)

вых волн, конседиментационных деформаций, иногда наблюдается градиционная слоистость, редко волновая рябь. Фация проксимального берегового склона сложена песчаником тонкозернистым, с глинистым цементом, редко с прослоями карбонатного цемента, с тонкими алевролит-глинистыми прослоями.

Во время формирования пластов БУ₆₋₁₂ наблюдается постепенное отступление моря в западном направлении. По керну прослеживаются мощные отложения каналов надводной дельтовой равнины и межрусловые (пойменные) отложения, которые диагностированы как фации приливно-отливной отмели, чередующиеся с маломощными приливно-отливными каналами и отложениями прибрежной равнины.

Состав и особенности генезиса цеолитов в терригенных отложениях

Как уже отмечалось выше, исследуемая территория неоднократно подвергалась существенным структурным перестройкам. Вследствие этого на месторождении сформировалась сложная система дизъюнктивных нарушений и сопутствующая им система трещин, подтвержденная записями каротажа и исследованиями керна. Генетически к таким зонам приурочено наличие в составе цемента песчаников цеолитов, который оказывает существенное влияние на разработку пластов группы БУ (продуктивные пласты БУ₁₃₋₁₅). Таким образом, к основным факторам, влияющим на процесс формирования цеолитов, можно отнести следующие: тектонический, седиментологический и метасоматический.

Современные представления говорят о том, что происхождение цеолитов связано главным образом с преобразованием пирокластического или иного силикатного материала в процессе диагенеза или катагенеза [4]. На формирование цеолитов определенное влияние оказывают и эпигенетические (наложенные) изменения продуктивных пластов. Эти изменения заключаются в формировании вторичных гидротермальных ассоциаций и сопровождаются дегидратацией ряда породообразующих минералов с возможным разуплотнением пород.

Размер пятен цеолитов может достигать нескольких миллиметров, и они хорошо диагностируются визуально в керне. Ломонтит образует агрегаты из призматических кристаллов с совершенной спайностью и хорошо выраженной ступенчатой отдельностью кристаллических агрегатов и выполняет роль порового и пойкилитового цемента в песчанике. По составу цеолит в коллекторах Мессояхской группы месторождений представлен ломонтитом, который проявляется почти исключительно в виде кальциевой разновидности (леонгадит) $\text{Ca}_4(\text{H}_2\text{O})_n[\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48}]$. Отсюда наблюдается его генетическая связь с местами, где встречается наибольшее количество кальция.

По данным исследователей, занимавшихся проблематикой цеолитов, на месторождениях северной части Западно-Сибирской плиты [5] цеолитсодержащая горная порода имеет песчано-алевритовый каркас, часть пор которого заполняется хлоритовым и карбонатным цементом, а другая часть – цеолитами. Такое представление достаточно хорошо объясняется выявленной стадийностью минералообразования для Мессояхской группы месторождений и показанной на рис. 3. Одними из первых образовались регенерационный кварц и каолинит, более поздней по времени образования можно считать гидрослюда. В дальнейшем происходило формирование хлорита, далее кристаллизовались цеолиты, заполняющие пространство между зернами с уже существующими пленками хлорита.

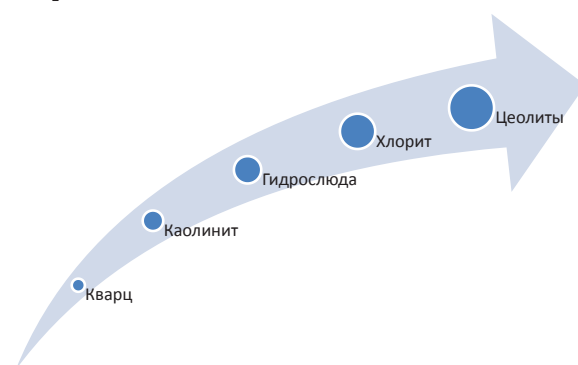


Рис. 3. Стадийность формирования аутигенных минералов в песчаниках Мессояхской группы месторождений

Как видно на рис. 3, вместе с цеолитами образуются глинистые минералы – каолинит, гидрослюда. Их формирование происходит на более ранних стадиях относительно цеолитов, поэтому для пород-коллекторов Мессояхской группы месторождений наблюдается следующая зависимость: в песчаниках, где содержится незначительное количество глинистых минералов, количество цеолитов достаточно велико, а в алевролитах с содержанием глинистых минералов до 10 % цеолиты и вовсе отсутствуют.

Наличие только одного типа цеолитов рядом авторов [6, 7] объясняется преобразованием всех минеральных видов цеолитов в ломонтит под воздействием температуры, давления, pH, химизма среды и др. Содержание цеолитов оказывает прямую связь на конечную цифру количества пор в песчано-алевритовых породах. Например, если в песчаниках содержание цеолитов достигает 13 %, то при этом средняя эффективная пористость (ϕ) может достигать 17 %. С уменьшением размера обломочных зерен уменьшается количество пор и цеолитов. В песчаниках мелко- и тонкозернистых содержание цеолитов и количество пор менее 10 %. В алевролитах цеолиты отсутствуют [8, 9].

Согласно проведенным исследованиям керна материала, наилучшими коллекторскими свойствами в разрезе пластов БУ₁₃₋₁₅ обладают фации средней

части морской дельты, где средняя пористость может достигать 17 %. Несколько ухудшенными свойствами обладают фации дельтовых каналов с пористостью около 15 %. Пористость в отложениях фаций проксимального фронта дельты и проксимального берегового склона, в которых чаще всего встречаются цеолиты, в среднем составляет около 14 %. Наихудшие коллекторские свойства имеют отложения морских заливов (рис. 4).



Рис. 4. Распределение пористости по данным ГИС для групп фаций пластов БУ₁₃₋₁₅ Мессояхской группы месторождений

Средний минеральный состав пород-коллекторов пластов БУ₁₃₋₁₅ для Мессояхской группы месторождений приведен на рис. 5. В пласте БУ₁₅ содержание цеолитов составляет около 9,0 % от общего количества цемента, для пласта БУ₁₄ эта цифра составляет 45,0 %, а для пласта БУ₁₃ равна почти 70,0 %. Такой характер распределения цеолитов четко коррелируется с пористостью пород-коллекторов. Если для пласта БУ₁₅ Мессояхской группы месторождений средняя пористость составляет около 14 %, то для пласта БУ₁₃ она уже составляет 18 %. На рис. 6 отображено описанное увеличение содержания цеолитов вверх по разрезу.

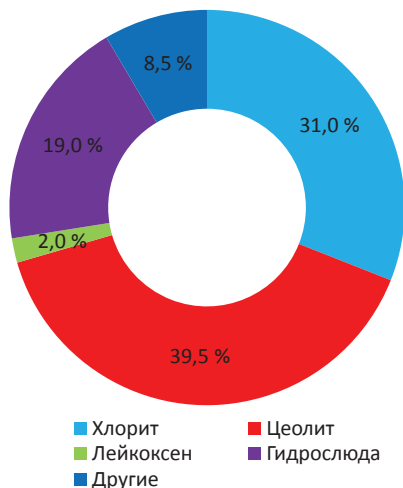


Рис. 5. Средний минеральный состав пород-коллекторов пластов БУ₁₃₋₁₅ Мессояхской группы месторождений

Процесс формирования цеолитовой ассоциации протекал достаточно продолжительное время, с периодами усиления или ослабления процесса. Учитывая масштабы распространения данной ассоциации по площади, морфологические особенности и вторичность процессов, с которыми связана цеолитизация уже сформировавшихся пород-коллекторов, можно говорить об эпигенетическом характере происхождения цеолитов [10]. Это предположение находит свое подтверждение при изучении шлифов, где хорошо видно, что цеолиты не только заполняют пустотное пространство, но и достаточно часто замещают отдельные зерна, как правило, полевых шпатов [4].

Изменение содержания цеолитов в породах-коллекторах пластов БУ₁₃₋₁₅ Мессояхской группы месторождений

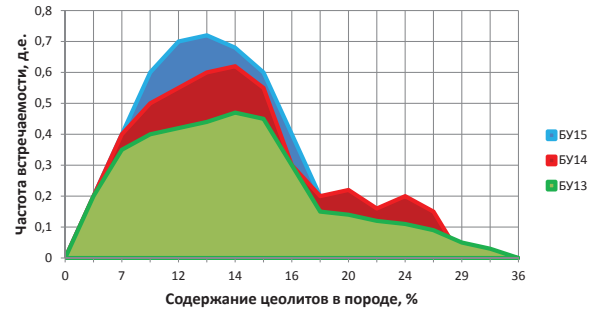


Рис. 6. Изменение содержания цеолитов в породах-коллекторах пластов БУ₁₃₋₁₅ Мессояхской группы месторождений

Разработка месторождений

Мессояхская группа месторождений до настоящего времени не разрабатывалась и находится на стадии подготовки к опытно-промышленной разработке – идет активная работа по доразведке месторождения, проведению и интерпретации 3Д сейсмички, отбору керна и пластовых флюидов, ГИС, ГДИ и т. д. Основные извлекаемые запасы месторождения сосредоточены в пласте ПК₁₋₃, который выделен как первоочередной объект для проведения промышленного эксперимента. Пласты БУ₁₃₋₁₅, в которых отмечена цеолитизация, относятся к второстепенным объектам. К сложностям извлечения запасов по второстепенным пластам можно отнести подгазовый характер распространения залежей, водонефтяные зоны, незначительные нефтенасыщенные толщины, а также высокую расчлененность объектов.

При формировании вариантов разработки для пластов БУ₁₃₋₁₅ учитывались условия залегания нефти, фильтрационные параметры коллекторов, возможность применения различных технологий, обеспечивающих максимальный КИН (коэффициент извлечения нефти) при экономически рентабельной добыче нефти. Известно, что при сложном геологическом строении, в условиях неоднородности низко- и среднепроницаемых коллекторов, наибольшая продуктивность и высокие технико-экономические показатели достигаются при использовании площадных систем заводнения. При прочих равных условиях эффективность и результативность системы заводнения зависит от «типа» добывающих и нагнетательных скважин, их местоположения, соотношения добывающих и нагнетательных скважин. Также на пластах БУ₁₃₋₁₅ для повышения эффективности выработки запасов нефти рекомендуется использование систем разработки с го-

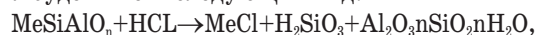
горизонтальными добывающими скважинами. Это позволит уменьшить плотность сетки скважин, увеличить темпы отбора нефти, обеспечить выработку запасов в зоне водо-нефтяного контакта, увеличить начальный дебит нефти и продлить безводный период работы эксплуатации пластов, сократить срок разработки месторождения. В связи с невысокой проницаемостью пластов БУ¹³⁻¹⁵ рекомендовано проведение ГРП (гидравлический разрыв пласта). Основная задача проведения ГРП в низко- и средне-проницаемых пластах Мессояхской группы месторождений состоит в снижении скин-эффекта в призабойной зоне пласта. Для этого рекомендуется проведение ГРП с образованием коротких, но довольно раскрытых трещин. Это позволит увеличить проницаемость в призабойной зоне и увеличить охват пласта воздействием в целом. Результаты ГРП зависят от степени засорения трещин и притрещинной зоны глинистыми частицами, поступающими из пласта, а также твердыми отложениями, выпадающими из нефти. Поэтому гидроразрыв пласта можно сочетать с обработкой скважин растворителями и кислотными композициями.

Отметим, что цеолитизация способна оказывать прямое влияние на динамику выработки остаточных запасов нефти и газа, выбора различных вариантов размещения эксплуатационных и нагнетательных скважин, прогноза добычи углеводородного сырья, планирования геолого-технологических мероприятий по повышению уровня добычи, определения наиболее рациональных вариантов разработки продуктивных горизонтов. Это происходит за счет того, что меняется характер процессов, происходящих в призабойной зоне.

По стандартным методикам [11] с использованием данных по определению относительных фазовых проницаемостей на керне в интервалах с присутствием ломонтита был определен характер насыщения. В качестве критической водонасыщенности использовались данные при 95...98 % обводненности, рассчитанной по касательной к функции Леверетта (с учетом соотношения вязкостей флюидов для пластов БУ: 2,42 и 1,73 МПа*с).

По стандартным уравнениям $P_{\text{н}}=f(K_{\text{н}})$, $P_{\text{н}}=f(K_{\text{н}})$ полученные уравнения критических водонасыщенностей были пересчитаны в критические сопротивления. При этом зависимости $P_{\text{н}}(K_{\text{н}})$ и $P_{\text{н}}(K_{\text{н}})$ в термобарических условиях для Мессояхской группы месторождений оказались некондиционными. Соответственно, критическое сопротивление, полученное по $P_{\text{н}}=f(K_{\text{н}})$ и $P_{\text{н}}=f(K_{\text{н}})$ в атмосферных условиях, занижено. Низкая минерализация пластовой воды, характерная для пластов БУ (от 8 до 10 г/л) приводит к образованию больших зон прониновения, что вносит дополнительные трудности в оценку УЭС (удельного электрического сопротивления) пластов. Чтобы свести погрешность оценки параметра насыщения к минимуму, необходимо привлекать дополнительную информацию по геологии, геолого-технологическим исследованиям, результатам опробования и т. д.

При классическом подходе способы увеличения коэффициента извлечения нефти, как правило, не касаются процессов, происходящих в призабойной зоне. Между тем, очевидно, что выбор способа обработки призабойной зоны при наличии в разрезе таких высокодисперсных минералов как ломонтит, каолинит, хлориты, оказывает прямое влияние на стабильность работы скважин. Это происходит вследствие того, что эти минералы при формировании окончательного облика пород-коллекторов занимают в их структуре поровое пространство, не входя в состав песчано-алевритового каркаса, и достаточно быстро загрязняют собой призабойную зону. Для улучшения показателей работы призабойной зоны авторами [12], имеющими опыт работы с породами-коллекторами, содержащими в своем составе большое количество цеолитов, предлагается активировать забой воздействием на него соляной кислоты. При этом реакция будет иметь следующий вид:



где Me – ион металла; H_2SiO_3 – гель кремниевой кислоты; $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ – гидрогель с переменным отношением окислов алюминия, кремния и молекул воды [11].

Хлориты, которые тоже входят в состав цемента на Мессояхской группе месторождений, при воздействии соляной кислотой должны довольно легко разлагаться, образуя желатинообразную массу с выделением SiO_2 . Следует отметить, что при достаточно высокой концентрации такой массы (более 30 %) существует вероятность образования твердого коллоида, наличие которого может существенно снизить проницаемость призабойной зоны. Изменить данное явление может использование смеси соляной и плавиковой кислот [12].



где HCl – соляная кислота; HF – плавиковая кислота; CH_3COOH – уксусная кислота [13].

Сама рецептура закачиваемого в пласт раствора будет сильно зависеть от содержания в породе цеолитов, их минеральной формы, а также количества хлоритов, гидрослюд и карбонатов. Данный вид химического воздействия уже был апробирован на месторождении Белый Тигр, где коллекторами являются роговообманково-биотитовые гранитоиды, однако, как и в случае с Мессояхской группой месторождений, содержание цеолитов и кальцита достаточно велико.

Выводы

Мессояхская группа месторождений относится к категории самых сложных в Западной Сибири. Одним из процессов, осложняющих разработку месторождений, является процесс цеолитизации. Основными факторами, влияющими на процесс формирования цеолитов, являются тектонический, седиментологический и метасоматический. Процесс цеолитизации четко приурочен к опреде-

ленному стратиграфическому горизонту – пластам БУ_{13–15}, которые формировались на границе фациальных обстановок – морской и континентальной. Диагностика цеолитов по геофизическим методам невозможна. Рекомендуется выполнять более качественное полевое описание керн в зонах, с возможным присутствием цеолитовой минерализации.

Показано, что характер распределения цеолитов четко коррелируется с пористостью пород-коллекторов. Цеолиты оказывают значительное влияние на работу призабойной зоны. Для улучшения показателей работы призабойной зоны предлагается активировать забой воздействием на него соляной кислоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности геологического строения и нефтегазоносность Среднемессояхского вала / С.Е. Агалаков, А.Н. Бабурин, С.Н. Беспалова и др. // Горные ведомости. – 2004. – № 1. – С. 48–72.
2. Вопросы тектоники Ямало-Гыданского региона и прилегающих территорий / В.С. Бочкарев, А.М. Брехунцов, П.В. Пенягин и др. // Горные ведомости. – 2005. – № 12. – С. 42–63.
3. Einsele G. Sedimentary Basins. Evolution, Facies, and Sediment Budget. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. – 628 p.
4. Коробов А.Д., Коробова Л.А., Ахлестина Е.Ф. Минеральные ассоциации продуктов гидротермального изменения – ключ к пониманию возникновения зон разуплотнения и фазовой зональности углеводородов (на примере Западной Сибири) // Известия Саратовского университета. – 2008. – Т. 8. – № 1. – С. 42–50.
5. Беляков Е.О. Построение петрофизических моделей фильтрационно-емкостных свойств текстурно-неоднородных терригенных коллекторов: дисс... канд. геол.-мин. наук. – Тюмень, 1998. – 276 с.
6. Поспелов В.В., Шнип О.А. Цеолиты нефтесодержащих пород шельфа Южного Вьетнама // Геология нефти и газа. – 1995. – № 7. – С. 38–43.
7. Брек Д. Цеолитовые молекулярные сита. – М.: Мир, 1976. – 781 с.
8. Поднебесных А.В. Особенности формирования цеолитов в нижнемеловых отложениях юга Гыданского полуострова // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: Матер. VII Всеросс. литологического совещания. – Новосибирск, 28–31 октября 2013. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. – Т. II. – С. 382–386.
9. Поднебесных А.В., Решетников Д.А. Проблемы диагностики цеолитов в продуктивных отложениях Мессояхской группы месторождений // Тюмень 2013: Новые геотехнологии для старых провинций: Доклады Междунар. научно-практ. конф. – Тюмень, 2013. URL: <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=67265/> (дата обращения: 13.08.2013).
10. Коссовская А.Г. Генетические типы цеолитов стратифицированных формаций // Литология и полезные ископаемые. – 1975. – № 2. – С. 23–44.
11. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом / под ред. В.И. Петерсилье. – М.; Тверь, ВНИГНИ, НПЦ «Тверьгеофизика», 2003. – 259 с.
12. Особенности кислотного воздействия на гранитоиды фундамента месторождения «Белый Тигр» / Г.Н. Белянин, М.А. Бабеев, Ф.А. Киреев, Ч.Л. Донг, О.Ф. Мартынцив, Ф.А. Туан, Х.Д. Тиен, Н.Т. Кханг // Нефтяное хозяйство. – 2001 – № 1. – С. 45–51.
13. Поспелов В.В. Некоторые особенности разработки залежей нефти в цеолитсодержащих породах фундамента // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2008. – Т. 3. URL: http://www.ngtp.ru/12/50_2008.pdf/ (дата обращения: 08.05.2013).

Поступила 07.10.2013 г.

THE PROBLEMS OF ZEOLITES DETECTION AND THEIR INFLUENCE ON DEVELOPMENT OF THE PRODUCTIVE RESERVOIRS IN THE MESSOYAKHA GROUP OF FIELDS

Aleksandr V. Podnebesnykh,

Cand. Sc., Gazpromneft NTC LLC, Russia, 625626, Tyumen,
Respubliki Street, 143A. E-mail: Podnebesnikh.AV@gazpromneft-ntc.ru

Vasily P. Ovchinnikov,

Dr. Sc., Tyumen State Oil and Gas University, Russia, 625000, Tyumen,
Volodarskogo Street, 38. E-mail: burenie@rambler.ru

It is found out that zeolites are formed in alkaline environment at diagenesis or katagenesis and reduce permeability and porosity of reservoir rocks. It is shown that zeolite content in reservoir rocks is directly related to the porosity value and can reach 13 % of the total volume of rock. It is quite difficult to detect zones of zeolitization by means of well logs. Therefore logs should be corrected for the possible content of zeolites on the base of core analysis data which provide detection of the intervals with zeolitization. The authors have determined that the process of zeolitization in Messoyakha group of fields is related to the specific stratigraphic intervals and namely with Suhodudinskaya Formation of Lower Cretaceous age. On a regional scale the zeolitized rocks occur in regional fault zones and zones with enclosing rocks undergone strong metasomatic changes. Based on the core and log data the existing depositional environment concept of producing reservoirs of Messoyakha group of fields has been revised and the most favorable conditions and periods of zeolites formation have been determined. In addition, based on the experience of development of fields with high zeolites content, the best method of near- wellbore treatment, which has a direct impact on oil recovery enhance, was offered.

Key words:

Zeolites, metasomatism, reservoir properties, lomontite, facies model, oil recovery, bottomhole zone, Messoyakha field group.

REFERENCES

1. Agalakov S.E., Baburin A.N., Bepalova S.N. Osobennosti geologicheskogo stroeniya i neftegazonosnost Srednemesoyakhskogo vala [Peculiarities of geological structure and oil and gas potential of Srednemesoyakhskiy bank]. *Gornye vedomosti*, 2004, no. 1, pp. 48–72.
2. Bochkarev B.C., Brekhuntsov A.M., Penyagin P.V. Voprosy tektoniki Yamalo-Gydanskogo regiona i prelegayushchikh territoriy [Issues of tectonics and in Yamalo-Gydansky region and neighbor territories]. *Gornye vedomosti*, 2005, no. 12, pp. 42–63.
3. Einsele G. *Sedimentary Basins. Evolution, Facies, and Sediment Budget*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1992, 628 p.
4. Korobov A.D., Korobova L.A., Akhlestina E.F. Mineralnye assotsiatsii produktov gidrotermalnogo izmeneniya – klyuch k ponimaniyu vozniknoveniya zon razuplotneniya i fazovoy zonalnosti uglevodorodov (na primere Zapadnoy Sibiri) [Mineral associations hydrothermal change products is the key to understanding the occurrence of zones of decompression and phase zonality (by the example of Western Siberia)]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta*, 2008, vol. 8, no. 1, pp. 42–50.
5. Belyakov E.O. *Postroenie petrofizicheskikh modeley filtratsionno-emkostnykh svoystv tekturno-neodnorodnykh terrigennykh kolektorov*. Kand. Diss. [Construction of petrophysical models of reservoir quality for textural non-uniform terrigenous reservoirs. Cand. Diss.] Tyumen, 1998. 276 p.
6. Pospelov V.V. Nekotorye osobennosti razrabotki zalezhey nefti v tseolitsoderzhashchikh porodakh fundamenta [Some features of developing oil reservoirs in zeolite-bearing rocks of the base]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. 2008, vol. 3. Available at: http://www.ngtp.ru/12/50_2008.pdf/ (accessed 08 May 2013).
7. Brek D. *Tseolitovye molekulyarnye sita* [Zeolite molecular sieve]. Moscow, Mir, 1976. 781 p.
8. Podnebesnykh A.V. Osobennosti formirovaniya tseolitov v nizhnemelovykh otlozheniyakh yuga Gydanskogo poluostrova [Features of forming zeolites in Lower Cretaceous deposits in the south of Gydansk peninsula]. *Materialy VII Vserossiyskogo litologicheskogo soveshchaniya* [Proc. VII All-Russian lithological meeting]. Novosibirsk, 28–31 October 2013. Novosibirsk, INGG SO RAN, 2013, vol. II, pp. 382–386.
9. Podnebesnykh A.V., Reshetnikov D.A. Problemy diagnostiki tseolitov v produktivnykh otlozheniyakh Messoyakhskoy gruppy mestorozhdeniy [Problems of diagnosing zeolites in productive sediments of Messoyakhskoy group of fields]. *Doklady mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Tyumen 2013: Novye geotekhnologii dlya starykh provintsiy»* [Reports of International research conference. New technologies for old provinces]. Tyumen, 2013. Available at: <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=67265/> (accessed 13 August 2013).
10. Kossovskaya A.G. Geneticheskie tipy tseolitov stratifitsirovannykh formatsiy [Genetic types of zeolites of stratified formations]. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 1975, no. 2, pp. 23–44.
11. *Metodicheskie rekomendatsii po podschetu geologicheskikh zapasov nefti i gaza obemnym metodom* [Methodic recommendations on calculation of original oil and gas by the volumetric procedure]. Ed. by V.I. Petersile. Moscow; Tver, Tvergeofizika, 2003. 259 p.
12. Belyanin G.N., Babets M.A., Kireev F.A., Dong Ch.L., Martynov O.F., Tuan F.A., Tien H.D., Khang N.T. Osobennosti kislotnogo vozdeystviya na granitoidy fundamenta mestorozhdeniya «Bely Tigr» [Peculiarities of acidic effect on granitoids in the base of «Bely Tigr» deposit]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2001, no. 1, pp. 45–51.
13. Pospelov V.V., Shnip O.A. Tseolity neftesoderzhashchikh porod shelfa Yuzhnogo Vyetnama [Zeolites of oil rock in the shelf area of South Vietnam]. *Geologiya nefti i gaza*, 1995, no. 7, pp. 38–43.

УДК 552.11:552.3: 550.93 (571.52)

ВОЗРАСТ И ПРИРОДА ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД ДАХУНУРСКОГО ПЛУТОНА, ЮГО-ВОСТОЧНАЯ ТУВА

Врублевский Василий Васильевич,

д-р геол.-минерал. наук, проф. кафедры динамической геологии
Томского государственного университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: vasvr@yandex.ru

Никифоров Анатолий Викторович,

канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр. лаборатории редкометалльного
магматизма Института геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 35. E-mail: nikav@igem.ru

Сугоракова Амина Мидхатовна,

канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотр. лаборатории геодинамики,
магматизма и рудообразования Тувинского института комплексного
освоения природных ресурсов СО РАН, Республика Тыва, 667010, г. Кызыл,
ул. Интернациональная, д. 117а. E-mail: amina@tikopr.fromtuva.ru

Лыхин Дмитрий Алексеевич,

канд. геол.-минерал. наук, науч. сотр. лаборатории
редкометалльного магматизма Института геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 35. E-mail: liha@igem.ru

Козулина Тамара Викторовна,

аспирант кафедры динамической геологии
Томского государственного университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: vasvr@yandex.ru

Юдин Денис Сергеевич,

канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр. лаборатории изотопно-
аналитических методов Института геологии и минералогии СО РАН,
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Каптюга, д. 3.
E-mail: travin@uiggm.nsc.ru

Исследования направлены на обоснование возраста, природы источников родоначальных магм и геодинамических условий внедрения щелочных интрузий Тувино-Монгольского террейна/микроконтинента, что является актуальным при проведении реконструкций развития Палеоазиатского океана и палеозойского магматизма в складчатом обрамлении Сибирского кратона. Изученный Дахунурский интрузивный массив ультраосновных фойдолитов и фойяитов на Сангиленском нагорье представляет собой раннекарбонную производную щелочного магматизма палеозоя Юго-Восточной Тувы. По впервые полученным прецизионным изотопным Ag-Ag данным его становление происходило ~ 328 млн лет назад. Выявленные методом ICP-MS геохимические особенности щелочных пород плутона предполагают интрузию в сложной геодинамической обстановке взаимодействия мантийного плюма с аккреционными комплексами активной континентальной окраины. На этом основании оцениваются длительность и условия тектонического режима формирования одной из крупных изверженных провинций Центрально-Азиатского складчатого пояса.

Ключевые слова:

Щелочной магматизм, геохронология, геохимия, мантийный плюм, активная континентальная окраина, нагорье Сангилен.

Введение

На Сангиленском нагорье в Юго-Восточной Тuve установлено более 20 сравнительно небольших по размерам дифференцированных щелочных интрузивных массивов, которые по составу петрографической ассоциации объединяются в виде

магматической серии эгирин-геденбергитовых фойяитов, ювитов и ийолит-уртитов [1]. Фойяиты преобладают только в значительно эродированных плутонах (Баянкольский интрузив). В остальных случаях (Харлинский, Чикский, Дахунурский и другие массивы) доминируют обогащенные нефе-

лином породы – фойдолиты. Кроме этого, в Центральном Сангиле известны массивы, которые сложены преимущественно амфиболовыми щелочными и нефелиновыми сиенитами (Коргередабинская, Тоскульская, Уланэргинская интрузии) и относятся к другому формационному типу [1].

Некоторые исследователи все нефелиновые породы вместе с проявленными в регионе субщелочными габброидами, щелочными сиенитами и щелочными гранитами считают производными сангиленского магматического комплекса среднего палеозоя [2]. До последнего времени оценки его радиологического возраста основывались на изотопных K–Ar и U–Th–Pb датировках, полученных в 60–70-е гг. прошлого столетия [3–6]. Разброс значений возраста пород составляет ~200–450 млн лет. Очевидно, это не позволяет объединять все проявления щелочного магматизма в Юго-Восточной Туве в рамках одного комплекса, и тем более считать его, как предложено [2], даже «ориентировочно раннедевонским». Вместе с тем анализ уже имеющихся геохронологических данных показывает, что в пределах Центрального Сангиленского развития фельдшпатоидного магматизма могло происходить в два временных этапа [4]: силурийско-девонский (венлок–эмс, ~430–402 млн лет) для по-

родной ассоциации с эгирин-геденбергитовыми фойяитами и каменноугольный (~330–304 млн лет) для амфиболовых нефелиновых сиенитов. С последним из них по возрасту сопоставимы редкометалльные щелочные граниты месторождения Улуг-Танзек (301 ± 1 млн лет, циркон, U–Pb; 296 ± 2 млн лет, рибекит, Ar–Ar) [7], иногда рассматриваемые как поздняя фаза сангиленского комплекса [2]. Приведенные нами данные $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -изотопного анализа и геохимические особенности Дахунурского массива в Центральном Сангиле позволяют предполагать импульсное проявление регионального щелочного магматизма в карбоне и его развитие в сложной окраинно-континентальной геодинамической обстановке.

Геологическая позиция и вещественный состав интрузивного массива

Дахунурский фойдолит-фойяитовый массив расположен в пределах Сангиленского выступа, который рассматривается как часть Тувино-Монгольского докембрийского террейна (микроконтинента) [8]. При этом предполагается, что в его цоколе присутствуют протерозойские кристаллические комплексы, а чехол сложен карбонатными, терригенными и вулканогенными породами поз-

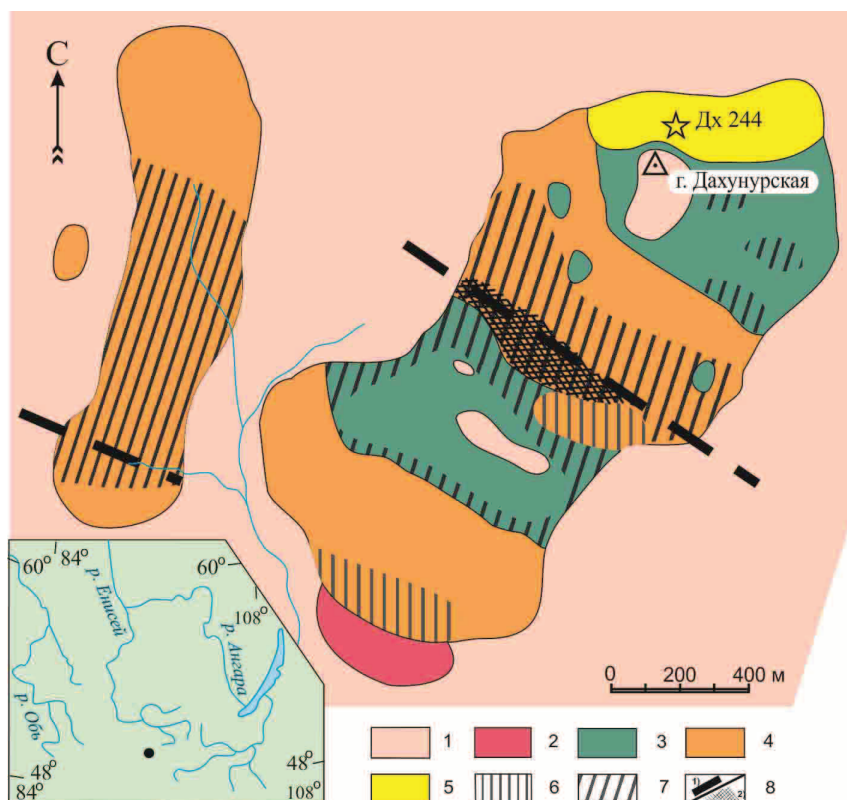


Рис. 1. Геологическая схема Дахунурского плутона (по [9] с изменениями) 1 – графитистые мраморы балыгтыгхемской свиты (PR3), 2 – плагиограниты таннуольского комплекса (PZ1), 3–7 – щелочные породы Дахунурского массива: (3) щелочные клинопироксениты (якупирангиты) и мельтейгиты, (4) ийолиты и ийолит-уртиты, (5) нефелиновые сиениты, (6) нефелин-цеолитовые пегматиты, (7) кальцитизированные и гранатсодержащие фойдолиты, скаполитизированные и нефелинизированные пироксениты, 8 – разрывные нарушения (а) и зона милонитизации (б). Звездочкой с номером отмечено место отбора пробы на Ar–Ar-изотопный анализ. На врезке показано географическое положение Дахунурского интрузива (50°21' с. ш., 96°45' в. д.)

дногo рифея–кембрия. Геологическая позиция щелочного интрузива обусловлена приуроченностью к северному плечу Нарынско-Балыктыгхемской субширотной грабен-синклинали в центральной части нагорья Сангилен, где он прорывает мраморы балыктыгхемской свиты верхнего протерозоя и контролируется зоной субмеридионального глубинного разлома [2]. В составе массива выделяется два сближенных крутопадающих тела с общей площадью выхода на поверхность ~1,5 км², сложенных якупирангитами, мельтейгитами, ийолитами, ийолит-уртитам, уртитам и нефелиновыми сиенитами (рис. 1). Среди фойдолитов с первичным нефелин-клинопироксеновым парагенезисом встречаются пегматоидные и метасоматически измененные участки с широко развитым кальцитом, шорломитом, цеолитом, а также карбонатитоподобные жильные образования [9, 10]. Для нефелиновых сиенитов характерно наличие зон с полосчатым строением и повышенным (до ~20...25 %) содержанием амфибола и биотита.

По химическому составу силикатные породы Дахунурского плутона (табл. 1) представляют собой магматическую серию ультраосновных фойдолитов и основных фельдшпатоидных сиенитов (мезократовых фойяитов) с характерной пониженной кремнекислотностью (SiO_2 ~39...46 мас. %), высокой щелочностью ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ~ до 15...17 мас. %; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ~ 3,7...5,9 мас. %) и глиноземистостью (Al_2O_3 ~ до 24...28 мас. %). От фойдолитов к фойяитам на фоне снижения магнeзиальности пород и содержаний Ca, Mg, Fe, Cr, Ni, V, Co, Sc происходит накопление большинства LILE (large ion lithophile elements) и HFSE (high field strength elements). Характер их поведения во многом соответствует особенностям редкоэлементного состава комбинированного источника типа CIAB+OIB (рис. 2) с проявлением Nb–Ta и Zr–Hf спектральных минимумов, свойственных производным надсубдукционного магматизма. По-видимому, участием литосферного субстрата обусловлены повышенные концентрации Rb, Ba, Sr, U, особенно заметные в нефелиновых сиенитах массива.

Распределение REE (rare earth elements) в щелочных породах при невысоких суммарных концентрациях элементов (~ 30...112 г/т; La/Yb ~3,1...10,0 г/т) также хорошо сопоставимо со средним составом базальтоидов континентальных островных дуг. Наиболее низкие содержания REE в уртитам и ийолит-уртитам (рис. 2) связаны с уровнем их накопления в доминирующем нефелине. Как и в случае аналогичных пород Кия-Шалтырского плутона в Кузнецком Алатау, можно предположить флотационный механизм сегрегации этого минерала в щелочной магме с переходом большей части REE в остаточный расплав. В целом о мультикомпонентном источнике вещества и сложном геодинамическом режиме Дахунурской интрузии позволяют судить вариации индикаторных соотно-

шений Zr, Nb, Ta, Th, Y, Yb (рис. 3) в изученных щелочных породах, которые свидетельствуют о ее внедрении в обстановке взаимодействия активной континентальной окраины с плюмом, контролирующим внутриплитный магматизм OIB-типа.

Таблица 1. Представительный химический состав щелочных пород Дахунурского плутона

Компонент	Обр. Дх248/1	Обр. Дх247	Обр. Дх243/1	Обр. Дх246	Обр. Дх244
SiO ₂	43,09	41,38	41,76	41,74	46,08
TiO ₂	1,35	1,43	0,77	0,44	1,23
Al ₂ O ₃	10,83	14,84	22,29	27,75	19,87
Fe ₂ O ₃	11,44	12,10	7,76	4,73	7,90
MnO	0,19	0,18	0,14	0,08	0,15
MgO	8,33	5,73	1,97	1,23	0,75
CaO	20,63	18,92	10,88	7,29	7,16
Na ₂ O	2,21	2,91	9,30	12,60	9,60
K ₂ O	0,37	0,71	1,96	2,68	2,17
P ₂ O ₅	0,14	0,79	0,56	0,32	0,31
П.п.п.	1,76	1,14	2,54	1,19	4,92
Сумма	100,34	100,13	99,93	100,05	100,14
Cr	26	8,9	8,9	11	6,5
Ni	94	11	3,9	4,5	2,5
V	193	148	68	38	29
Co	41	28	16	10	11
Sc	28	4,7	1,1	0,6	1,1
Cs	0,9	0,04	0,18	0,11	0,27
Rb	6,9	6,1	23	16	35
Ba	126	90	366	119	952
Sr	398	501	895	821	1611
Nb	1,5	1,1	2,6	0,9	13
Ta	0,17	0,17	0,24	0,23	1,2
Zr	136	152	112	46	128
Hf	3,8	3,4	2	0,89	2,9
Y	21	21	16	5,5	20
Th	0,61	0,84	1,6	0,73	2,6
U	0,59	0,52	0,92	0,64	1,8
Pb	2,8	1,5	5,6	2,8	11
La	7,1	12	18	5	12
Ce	22	33	45	11	30
Pr	3,4	4,4	6,1	1,5	4,2
Nd	17	21	25	6	18
Sm	4,1	4,3	4,9	1,4	4,1
Eu	1,2	1,3	1,4	0,44	1,1
Gd	4,3	4,4	3,9	1,2	3,8
Tb	0,71	0,78	0,59	0,21	0,65
Dy	4,4	3,9	3,1	1,1	3,8
Ho	0,92	0,77	0,58	0,22	0,77
Er	2,2	2,2	1,6	0,66	2,1
Tm	0,37	0,37	0,26	0,09	0,34
Yb	2,3	2,3	1,8	0,78	2,5
Lu	0,38	0,34	0,31	0,11	0,3
ΣREE	70,38	91,06	112,54	29,71	83,66

Примечание. Обр. Дх248/1 – якупирангит, Обр. Дх247 – мельтейгит, Обр. Дх243/1 – ийолит, Обр. Дх246 – ийолит-уртит, Обр. Дх244 – нефелиновый сиенит. Содержание оксидов (мас. %, РФА) и редких элементов (г/т, ICP-MS) в породах определено в Аналитических центрах ИГМ СО РАН (Новосибирск), ТГУ (Томск), ИМГРЭ (Москва).

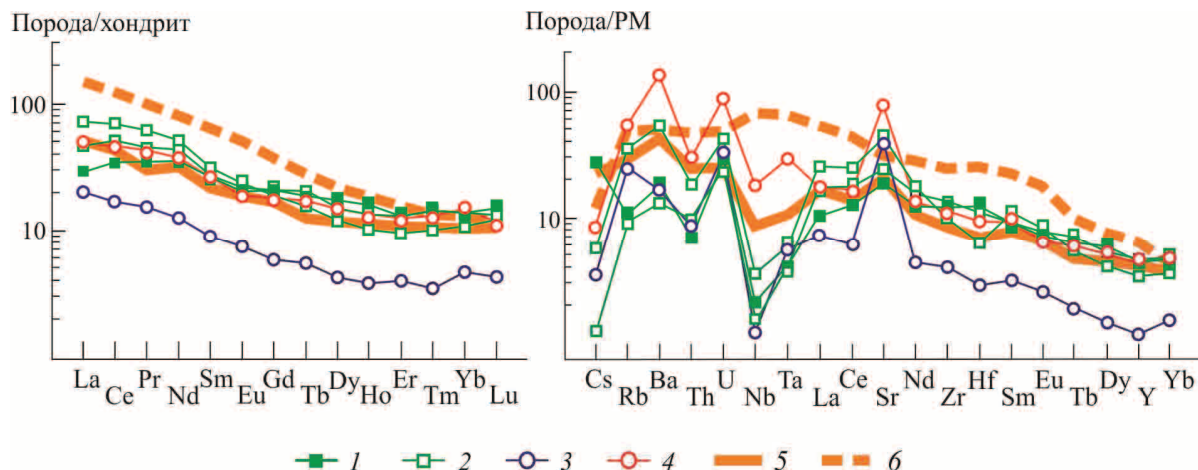


Рис. 2. Распределение редких элементов в щелочных породах Дахунурского плутона: 1 – якупирангит, 2 – мельтейгит и ийолит, 3 – ийолит-уртит, 4 – нефелиновый сиенит, 5, 6 – средние составы базальтов континентальных островных дуг (CIAВ, 5) и океанических островов (OIB, 6) [11, 12]. Концентрации элементов нормированы по составам хондрита CI и примитивной мантии (PM) [12]

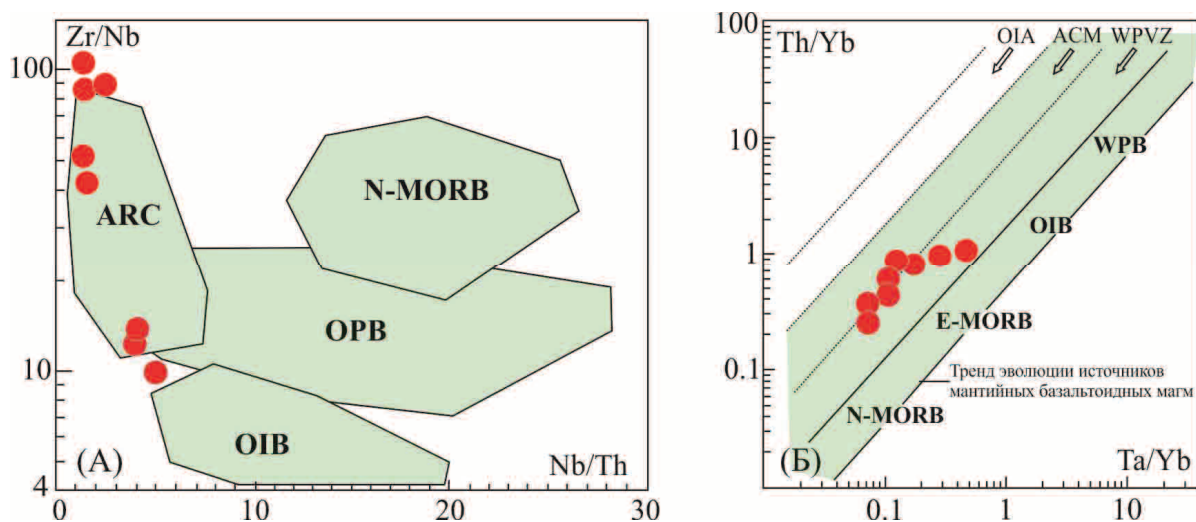


Рис. 3. Соотношения HFS-элементов в щелочных породах Дахунурского плутона (А) Диаграмма Zr/Nb–Nb/Th. Источники и композиционные поля базальтоидов разных тектонических обстановок приведены по [13]: ARC – островодужные базальты; N-MORB – базальты срединно-океанических хребтов, OIB – базальты океанических островов, OPB – базальты океанических плато. (Б) Диаграмма Th/Yb–Ta/Yb. Дискриминация магматических пород проводится по [14]: OIA – океанические островные дуги, ACM – активные континентальные окраины, WPVZ – внутриплитные вулканические зоны, MORB – базальты срединно-океанических хребтов, OIB – базальты океанических островов, WPB – внутриплитные океанические базальты

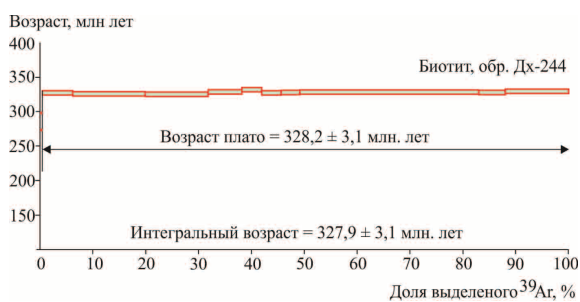
Время и геодинамические условия проявления щелочного магматизма

Известные ранее немногочисленные данные изотопного датирования минералов из фойдолитов Дахунурского массива определяют возраст его становления в очень широком диапазоне от рубежа силур–девон (~402–420 млн лет, K–Ar по нефелину и U–Pb по везувияну) до раннего карбона (~334 млн лет, K–Ar по биотиту) [3, 4, 6]. Для уточнения времени образования интрузива проведен прецизионный изотопный Ar–Ar-анализ фракции (0,25...0,5 мм) слюды, отобранной из нефели-

новых сиенитов в районе горы Дахунурская (рис. 1). По химическому составу минерал представляет собой титанистый ферробиотит (SiO₂ 32,9, TiO₂ 3,3, Al₂O₃ 13,6, FeO 29,6, MnO 0,5, MgO 4,9, Na₂O 0,4, K₂O 9,1 мас. %; обр. Дх–244, ср. 8 ан.). После совместного облучения навесок биотита и эталонного образца в кадмированном канале ядерного реактора (Томский политехнический университет) и очистки выделенного аргона по стандартной методике [15] его изотопный состав измерялся на масс-спектрометре Noble gas 5400 в ИГМ СО РАН (Новосибирск).

Таблица 2. Результаты изотопного $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -анализа породообразующего биотита из нефелинового сиенита Дахунурского плутона

T, °C	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\Sigma^{39}\text{Ar}$ (%)	Ca/K	Возраст, млн лет
Обр. Дх-244, биотит, 40,9 мг, $f=0,004023\pm0,000042$, возраст плато $328,2\pm3,1$ млн лет							
500	$76,7\pm0,67$	$0,038\pm0,0073$	$0,610\pm0,339$	$0,115\pm0,0067$	0,4	$2,18\pm1,220$	$285,7\pm12,6$
600	$52,2\pm0,04$	$0,020\pm0,0004$	$0,112\pm0,002$	$0,009\pm0,0002$	6,2	$0,40\pm0,008$	$327,2\pm3,1$
650	$50,4\pm0,01$	$0,020\pm0,0002$	$0,039\pm0,006$	$0,004\pm0,0002$	19,9	$0,14\pm0,023$	$326,6\pm3,1$
700	$50,3\pm0,02$	$0,020\pm0,0004$	$0,021\pm0,007$	$0,004\pm0,0003$	31,9	$0,08\pm0,025$	$325,8\pm3,1$
750	$50,8\pm0,02$	$0,020\pm0,0003$	$0,016\pm0,019$	$0,004\pm0,0001$	38,3	$0,06\pm0,067$	$328,7\pm3,1$
800	$51,2\pm0,04$	$0,020\pm0,0004$	$0,019\pm0,029$	$0,003\pm0,0006$	42,1	$0,07\pm0,106$	$332,1\pm3,4$
850	$51,2\pm0,03$	$0,021\pm0,0009$	$0,048\pm0,036$	$0,006\pm0,0008$	45,7	$0,17\pm0,129$	$327,3\pm3,5$
900	$51,7\pm0,02$	$0,020\pm0,0007$	$0,105\pm0,021$	$0,007\pm0,0006$	49,2	$0,38\pm0,075$	$327,6\pm3,3$
1000	$50,2\pm0,01$	$0,020\pm0,0005$	$0,020\pm0,003$	$0,002\pm0,0005$	83,1	$0,07\pm0,010$	$328,4\pm3,1$
1050	$51,2\pm0,02$	$0,019\pm0,0006$	$0,093\pm0,011$	$0,006\pm0,0003$	88,1	$0,34\pm0,041$	$328,0\pm3,2$
1130	$51,1\pm0,02$	$0,020\pm0,0002$	$0,145\pm0,012$	$0,004\pm0,0002$	100	$0,52\pm0,043$	$330,4\pm3,2$

**Рис. 4.** Изотопное $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирование биотита из нефелинового сиенита Дахунурского плутона. Стрелками показано возрастное плато

Полученный спектр выделения аргона по биотиту фойяитов Дахунурского массива характеризуется хорошо выраженным плато с возрастом $T=328\pm3$ млн лет и максимальной долей кумулятивного ^{39}Ar (рис. 4, табл. 2). Это значение можно принять за время закрытия $\text{Ar}-\text{Ar}$ -изотопной системы в слюде и завершения кристаллизации нефелиновых сиенитов, что позволяет предполагать их образование в раннем карбоне не древнее визейского века. На Сангиленском нагорье близкий $\text{K}-\text{Ar}$ -изотопный возраст имеют породообразующие биотиты из амфиболовых нефелиновых сиенитов Тоскульского (~330 млн лет), Уланэргинского (~322 млн лет), Коргеретабинского (~304 млн лет) интрузивных массивов, которые не содержат в своем составе разновидности мельтейгит-ийолит-уртитового ряда, обычные для ассоциации с эгирин-геденбергитовыми фойяитами [4]. $\text{K}-\text{Ar}$ -датировки по нефелину фойдолитов и фойяитов Баянкольского и Харлинского плутонов демонстрируют в среднем значительно более древний возраст $\sim 420\pm 10$ млн лет и даже в позднем уртит-перматите Дахунурского массива он не моложе эмса (~402 млн лет) [6]. Опираясь на полученные нами данные современного $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -изотопного анализа, следует либо поставить под сомнение в целом возможность и достоверность $\text{K}-\text{Ar}$ -датирования нефелина (особенно палеозойского возраста) и считать все проявления фельдшпатоидного маг-

матизма в Центральном Сангилене раннекарбонными, либо надо признать, что щелочной магматизм имел полихронный (с интервалом ~100–150 млн лет) и телескопированный характер. По нашим неопубликованным геохронологическим ($\text{U}-\text{Pb}$, $\text{Sm}-\text{Nd}$) данным в этом случае пульсационное внедрение интрузий выглядит вполне вероятным.

По существующим представлениям, после распада Родинии и образования Палеоазиатского океана Сибирский континент испытал значительный дрейф. Начиная с фанерозоя, при его перемещении и аккреционно-коллизиионном росте предполагается взаимодействие с несколькими разновозрастными горячими точками, которые были производными эволюции долгоживущего суперплюма, аналогичного современному горячему полю мантии [16]. В этом отношении развитие карбонного магматизма Юго-Восточной Тувы могло определяться влиянием плюма, который по своему возрасту и местоположению соответствовал бы параметрам Исландской горячей точки/Гоби-Тянь-Шаньского магматического ареала. По-видимому, ее воздействие на перекрывающую активную окраину Сибирского палеоконтинента (Забайкалье в современных координатах) обусловило внутриплитную магматическую активность и формирование Баргузино-Витимской изверженной провинции в интервале ~320–280 млн лет назад [7]. Наряду с палеозойскими щелочными интрузиями Витимской зоны, характерной чертой состава провинции является широкое распространение гранитоидов. При этом массивы редкометалльных щелочных гранитов Восточной Тувы объединяются в самостоятельный улуг-танзекский комплекс, сформированный ~300 млн лет назад на хронорубеже карбон–пермь [7]. Нами предполагается, что внедрение пространственно сближенных с ними на Сангилене фойдолит-фойяитовых интрузий раннекарбонного возраста (~325–330 млн лет) также связано с деятельностью данного плюма и предшествовало его максимальному воздействию на континентальную кору и масштабному анатексису. Основываясь на от-

носителем раннего развития периферического фельдшпатоидного магматизма, проявленного на территории Восточной Тувы, не исключается возможность более длительного формирования Баргузино-Витимской изверженной провинции. Согласно полученным геохимическим данным представляется, что активность щелочного магматизма на первоначальном этапе ее возникновения была об-

условлена процессами плюм-литосферного взаимодействия в условиях активной транзитали.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проекты 14.B37.21.1257, 5.3143.2011), Правительства РФ (грант 14.B25.31.0001 BIO-GEO-CLIM) и РФФИ (гранты 11-05-00144, 12-05-00801, 12-05-00533, 13-05-00181, 13-05-00101, 14-05-00494).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яшина Р.М. Щелочной магматизм складчато-глыбовых областей (на примере южного обрамления Сибирской платформы). – М.: Наука, 1982. – 274 с.
2. Хомичев В.Л., Бухаров Н.С., Минин В.А. Эталон сангиленского габбро-нефелинсит-щелочногранитового комплекса (Юго-Восточная Тува). – Новосибирск: СНИИГТИМС, 2009. – 193 с.
3. Зыков С.И., Ступникова Н.И., Павленко А.С. и др. Абсолютный возраст интрузий Восточно-Тувинского региона и Енисейского кряжа // Геохимия. – 1961. – № 7. – С. 547–560.
4. Яшина Р.М., Борисевич И.В. Абсолютный возраст щелочных пород Восточной Тувы // Абсолютное датирование тектономагматических циклов и этапов оруденения. – М.: Наука, 1966. – С. 326–336.
5. Дергачев В.Б. О возрасте и радиологических датировках нефелиновых пород Сангилена (Юго-Восточная Тува) // Геология и геофизика. – 1973. – № 7. – С. 64–71.
6. Кононова В.А. Якупирангит-уртитовая серия щелочных пород. – М.: Наука, 1976. – 215 с.
7. Ярмолук В.В., Никифоров А.В., Сальникова Е.Б. и др. Редкометалльные гранитоиды месторождения Улуг-Танзек (Восточная Тува): возраст и тектоническое положение // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 430. – № 2. – С. 248–253.
8. Кузьмичев А.Б. Тектоническая история Тувино-Монгольского массива: раннебайкальский, позднебайкальский и раннекаледонский этапы (под ред. Е.В. Склярова). – М.: ПРОБЕЛ-2000, 2004. – 192 с.
9. Кононова В.А. Уртит-ийолитовые интрузии Тувы и роль метасоматических процессов при их формировании // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1957. – № 5. – С. 37–55.
10. Дергачев В.Б. О карбонатах Сангилена (Юго-Восточная Тува) // Геология и геофизика. – 1973. – № 9. – С. 135–137.
11. Kelemen P. B., Hanghøj K., Greene A. R. One View of the Geochemistry of Subduction-related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust // Treatise on Geochemistry. – 2003. – V. 3. – P. 593–659.
12. Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the ocean basins (Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry). – 1989. – № 42. – P. 313–345.
13. Condie K.C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // Lithos. – 2005. – V. 79. – P. 491–504.
14. Gorton M.P., Schandl E.S. From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks // The Canadian Mineralogist. – 2000. – V. 38. – P. 1065–1073.
15. Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Поляков Г.В. и др. Ар-Ар-изотопный возраст лампроитовых даек чуйского комплекса, Горный Алтай // Доклады Академии наук. – 2004. – Т. 399. – № 4. – С. 516–519.
16. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province // Earth-Science Reviews. – 2010. – V. 102. – № 1/2. – P. 29–59.

Поступила 21.09.2013 г.

UDC 552.11:552.3: 550.93 (571.52)

THE AGE AND ORIGIN OF ALKALINE ROCKS OF THE DAKHUNUR PLUTON, SOUTH-EASTERN TUVA

Vassily V. Vrublevskii,

Dr. Sc., Tomsk State University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 36. E-mail: vasvr@yandex.ru

Anatoly V. Nikiforov,

Cand. Sc., Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy
and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Russia, 119017, Moscow,
Staromonetny street, 35. E-mail: nikav@igem.ru

Amina M. Sugorakova,

Cand. Sc., Tuva Institute of Complex Development of Natural Resources,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Russia, 667010, Republic
of Tuva, Kyzyl, Internatsionalnaya street, 117a. E-mail: amina@tikopr.fromtuva.ru

Dmitry A. Lykhin,

Cand. Sc., Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy
and Geochemistry, Russian Academy of Sciences,
Russia, 119017, Moscow, Staromonetny street, 35. E-mail: liha@igem.ru

Tamara V. Kozulina,

Tomsk State University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 36. E-mail: vasvr@yandex.ru

Denis S. Yudin,

Cand. Sc., Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, Russia, 630090, Novosibirsk,
Academka Kaptyuga avenue, 3. E-mail: travin@uiggm.nsc.ru

The research is aimed at proving the age, nature of parental magma sources, and geodynamic conditions, under which alkaline intrusions of the Tuva-Mongolian terrain were introduced. That is relevant when reconstructing development of the Paleozoic Ocean and Paleozoic magmatism in folded frames of the Siberian Craton. The studied Dakhunur intrusion of ultrabasic foidolites and foyaites in the Sangilen Upland is an Early Carboniferous derivative of a Paleozoic alkaline magmatism of the South-Eastern Tuva. According to the precision isotopic Ar-Ar data obtained for the first time, its formation took place ~ 328 Ma. Geochemical features of alkaline rocks of pluton revealed by ICP-MS method indicate the intrusion occurred in a difficult geodynamic environment, where mantle plume interacted with accretionary complexes of active continental margin. Based on this fact, the duration and conditions of a tectonic regime of formation of one of the largest igneous provinces in the Central Asian folded belt are estimated.

Key words:

Alkaline magmatism, geochronology, geochemistry, mantle plume, active continental margin, Sangilen Upland.

REFERENCES

1. Yashina R.M. *Shchelochnoy magmatizm skladchato-glybovykh oblastey (na primere uyzhnogo obramleniya Sibirskoy platformy)* [Alkaline magmatism of the folded areas in the southern framing of the Siberian craton]. Moscow, Nauka, 1982. 274 p.
2. Khomichev V.L., Bukharov N.S., Minin V.A. *Etalon sangilenskogo gabbro-nefelinsyenit-shchelochnogranitnogo kompleksa (Yugo-Vostochnaya Tuva)* [Etalon of the Sangilen gabbro-nepheline syenite-alkaline granite complex (South-Eastern Tuva)]. Novosibirsk, SNIIGGIMS, 2009. 193 p.
3. Zhykov S.I., Stupnikova N.I., Pavlenko A.S. Absolutnyy vozrast intruziy Vostochno-Tuvinskogo regiona i Eniseyskogo kryazha [The age of intrusions of the Eastern Tuva and Yenisei Ridge]. *Geokhimiya – Geochemistry*, 1961, no. 7, pp. 547–560.
4. Yashina R.M., Borisevich I.V. *Absolutnyy vozrast shchelochnykh porod Vostochnoy Tuvy* [The age of alkaline rocks in the Eastern Tuva: Absolute Dating of the tectono-magmatic cycles and stages of mineralization]. Moscow, Nauka, 1966. pp. 326–336.
5. Dergachev V.B. O vozraste i radiologicheskikh datirovках nefelinovykh porod Sangilena (Yugo-Vostochnaya Tuva) [On the age and radiological dating nepheline rocks of the Sangilen upland (South-Eastern Tuva)]. *Geologiya i geofizika – Geology and geophysics*, 1973, no. 7, pp. 64–71.
6. Kononova V.A. *Yakupirangit-urtitovaya seriya shchelochnykh porod* [The yakupirangite-urtite series of alkaline rocks]. Moscow, Nauka, 1976. 215 p.
7. Yarmolyuk V.V., Nikiforov A.V., Salnikova E.B. Redkometallnye granitoidy mestorozhdeniya Ulug-Tanze (Vostochnaya Tyva): vozrast i tektonicheskoe polozhenie [Rare-metal granitoids of the Ulug-Tanze deposit (Eastern Tyva): age and tectonic setting]. *Doklady Akademii Nauk*, 2010, vol. 430, no. 1. pp. 95–100.

8. Kuzmichev A.B. *Tektonicheskaya istoriya Tuvino-Mongolskogo massiva: rannebaykalsky, pozdnebaykalsky i rannekaledonsky etapy* [Tectonic history of the Tuva-Mongolian Massif: Early Baikalian, Late Baikalian and Early Caledonian stages]. Ed. by E. Sklyarov. Moscow, PROBEL-2000, 2004. 192 p.
9. Kononova V.A. Urtit-iyolitovye intruzii Tuvy i rol metasomaticheskikh protsessov pri ikh formirovanii [Urtite-ijolite intrusions of the Tuva and the role of rock-forming metasomatic processes]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geologicheskaya – Bulletin of the AS SSSR*, 1957, no. 5, pp. 37–55.
10. Dergachev V.B. O karbonatitakh Sangilena (Yugo-Vostochnaya Tuva) [On the carbonatites of the Sangilen upland (South-Eastern Tuva)]. *Geologiya i geofizika – Geology and geophysics*, 1973, no. 9, pp. 135–137.
11. Kelemen P. B., Høghøj K., Greene A.R. One View of the Geochemistry of Subduction-related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust. *Treatise on Geochemistry*, 2003, vol. 3, pp. 593–659.
12. Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Magmatism in the ocean basins (eds. A.D. Saunders, M.J. Norry). *Geol. Soc. Special Publ.*, 1989, no. 42, pp. 313–345.
13. Condie K.C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? *Lithos*, 2005, vol. 79, pp. 491–504.
14. Gorton M.P., Schandl E.S. From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *The Canadian Mineralogist*, 2000, vol. 38, pp. 1065–1073.
15. Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Polyakov G.V. Ar–Ar isotopic age of lamproite dikes of the Chuiskii complex, Gorny Altai. *Doklady Earth Sciences*, 2004, vol. 399, no. 9, pp. 1252–1255.
16. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province. *Earth-Science Reviews*, 2010, vol. 102, no. 1/2, pp. 29–59.

Гидрогеология

УДК 550.42:577.4(571.1)

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБРАЗОВАНИЯ БОЛОТ В ТАЁЖНОЙ ЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Савичев Олег Геннадьевич,

д-р географ. наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: OSavichev@mail.ru

Паромов Сергей Владимирович,

аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30; гидролог ОАО «Волжский подводник» Омского регионального центра Томского управления подводно-технических работ, Россия, 644033, г. Омск, ул. Химиков, д. 8. E-mail: ramondasilva@mail.ru

Актуальность работы: Отсутствие удовлетворительных ответов на целый ряд вопросов взаимосвязей между процессами формирования болот, водного и твёрдого стока, изменения речных русел ограничивает достоверность долгосрочных прогнозов изменения окружающей среды на заболоченных территориях Западной Сибири и оценок антропогенного воздействия на болотные экосистемы, что во многих случаях приводит к усилению негативного воздействия вод и возникновению чрезвычайных ситуаций, в том числе на объектах нефтегазового комплекса.

Цель работы: выявление наиболее общих механизмов взаимовлияния речных и болотных систем, характеризующихся преобладанием противоположных по воздействию на окружающую среду процессов эрозии и аккумуляции вещества.

Методы исследования: географо-гидрологический метод, математическое моделирование гидрологических процессов.

Результаты и выводы: Выявлен и количественно обоснован механизм взаимосвязей между процессами формирования водного стока, возникновения и эволюции болот в таёжной зоне Западной Сибири на уровне водосборов водотоков первого-третьего порядков. Показано, что в настоящее время в условиях избыточного или нормального увлажнения болотообразование начинается и/или развивается в условиях затруднённого водного стока на фоне избыточного увлажнения. Установлено, что важную роль играют не только абсолютные значения стока, но и его изменчивость как в пределах многолетнего периода, так и внутри года. Сделан вывод о том, что хозяйственная деятельность, связанная с приоритетным развитием нефтегазового комплекса, может способствовать заболачиванию за счёт ухудшения поверхностного и подповерхностного стока вследствие переобводнения участков, примыкающих к инженерным системам и сооружениям.

Ключевые слова:

Гидрологический анализ, гидрологические процессы, болотообразование, Западная Сибирь, водный баланс.

Введение

История развития современных болот в таёжной зоне Западной Сибири насчитывает всего около 10–12 тыс. лет. За этот относительно короткий (в геологическом масштабе) срок болотный процесс достиг весьма значительных масштабов влияния на все компоненты природной среды, в связи с чем его обоснованно рассматривают на уровне активно действующих экзогенных процессов [1]. При этом заболачивание происходило раньше и происходит

сейчас двумя путями: в результате расширения границ уже существующих торфяных болот (аллохтонная форма заболачивания) и вследствие формирования новых заболоченных площадей на плоских участках рельефа и в небольших депрессиях поверхности (автохтонное заболачивание).

Данные процессы применительно к Западной Сибири достаточно подробно описаны в работах М.И. Нейштадта [2, 3], Н.А. Караваевой [4], К.Е. Иванова и соавторов [5], О.Л. Лисс с соавтора-

ми [6] и ряда других исследователей. Однако до сих пор остаются не полностью раскрытыми вопросы взаимосвязи гидрологических и болотных процессов, что существенно затрудняет понимание общей картины болотообразования в регионе и резко снижает достоверность прогнозов дальнейшей эволюции болот в частности и окружающей среды в целом. Например, возникает чрезмерно высокая степень неопределённости в оценке изменения состояния болотных систем и многолетнемёрзлых грунтов на фоне наблюдаемых изменений климата и расширения хозяйственной деятельности, связанной с добычей и транспортом углеводородов. Всё это и определило цель рассматриваемой работы – выявление наиболее общих механизмов взаимовлияния речных и болотных систем, характеризующихся преобладанием противоположных по воздействию на окружающую среду процессов эрозии и аккумуляции вещества.

Объект и методика исследования

В работе использованы материалы исследований, выполненных при непосредственном участии и/или под руководством авторов в 2001–2013 гг. в Томском политехническом университете (ТПУ), ОАО «Томскгеомониторинг» и ООО «ИНГЕОТЕХ». В качестве основных объектов исследования выбраны болотные экосистемы в водосборах левых притоков реки Обь – рек Чая, Парабель и Васюган. Кроме того, привлекались данные по болотно-озёрным системам в водосборах рр. Тым и Тром-Юган (правые притоки р. Обь). Район исследований схематично показан на рис. 1. Более подробное описание изученных объектов приведено в [7–9].

Методика исследований включала в себя полевые обследования речных и болотных систем (оценку высотных отметок поверхности водосборов, уровней речных, грунтовых и болотных вод, измерение мощности торфяной залежи), а также расчё-

ты водного стока с болот по методике, приведённой в [10, 11], анализ материалов топогеодезических и гидрологических работ согласно [12–14], и данных дистанционного зондирования болот, полученных совместно с В.А. Базановым, А.А. Скугаревым, В.А. Льготиним и А.Е. Березиным [1, 7, 15].

Результаты исследования и их обсуждение

Хронология развития речной сети Западной Сибири в голоцене является весьма спорной с точки зрения различных авторов, предложивших в разное время гипотезы водного стока в: 1) Северный Ледовитый океан между несомкнувшимися языками уральских и сибирских ледников, либо при отсутствии наземного оледенения, либо между разновременными уральскими и сибирскими ледниками, либо через ледник (в том числе под ледником); 2) в Арало-Каспийский бассейн через Тургайский прогиб; 3) в бессточный Западно-Сибирский бассейн (море) [16]. Не затрагивая непосредственно этот важнейший вопрос, связанный с проблемой определения возраста существующих речных систем, отметим, что в любом случае одной из причин заболачивания Западно-Сибирской равнины могло быть постоянное переформирование речных русел в легко размываемых грунтах при отсутствии древесной растительности и избыточном увлажнении водосборов в результате таяния ледников, выпадения атмосферных осадков и затруднённости водного стока за пределы рассматриваемой территории [2, 5, 6, 17, 18].

В подобных условиях наличие многочисленных стариц в ряде случаев стало катализатором заболачивания региона, причём эвтрофикация пойменных водоёмов продолжается (хоть и не так интенсивно, как несколько тысяч лет назад) и в настоящее время (рис. 2). Следовательно, русловой процесс активизировал болотообразование, которое в последующем привело к некоторой стабилизации



Рис. 1. Схема расположения района исследований болотных систем в таёжной подзоне Западной Сибири



Рис. 2. Заболоченный пойменный водоём в Александровском Приобье; фото С.В. Паромова



Рис. 3. Заболоченная долина безымянного водотока и его притока в Александровском Приобье; фото С.В. Паромова

русловых деформаций, по крайней мере, на малых реках [8, 19]. Более того, в настоящее время наблюдается захват болотами не только водосборных территорий, но и самих русел малых водотоков, вплоть до фактического исчезновения некоторых из них (рис. 3). Дальнейшей стадией болотного процесса стало формирование вторичной речной сети болотных водотоков и водоёмов в условиях избыточного или умеренного увлажнения и ухудшающихся условий стекания воды, причём в ряде случаев русла болотных водотоков формируется на водоразделах исчезнувших первичных рек (рис. 4).

В случаях, когда формирование даже внутриболотных водотоков затруднено из-за незначитель-

ных уклонов и значительного сопротивления среды, возможно возникновение внутриболотных водоёмов в диапазоне от форм внутриболотных экосистем (например, грядово-мочажинно-озеркового комплекса) до весьма крупных озёр (например, озера Мирное с площадью акватории 18 км²).

Данный процесс при определённых обстоятельствах может быть проинтерпретирован как проявление глобального потепления, хотя и не имеет к нему прямого отношения. С учётом этого нужно более внимательно относиться к методике сопоставления разновременных космоснимков, на основании которого некоторыми авторами делаются вполне однозначные выводы о деградации много-

летней мерзлоты в Сибири и появлении на протавших минеральных и органических грунтах водоёмов (например, в [20, 21]). Безусловно, возможен и этот сценарий, но для таёжной зоны всё же наблюдается преимущественно переобводнение болот, особенно в нижнем течении крупных притоков р. Обь (рис. 5).

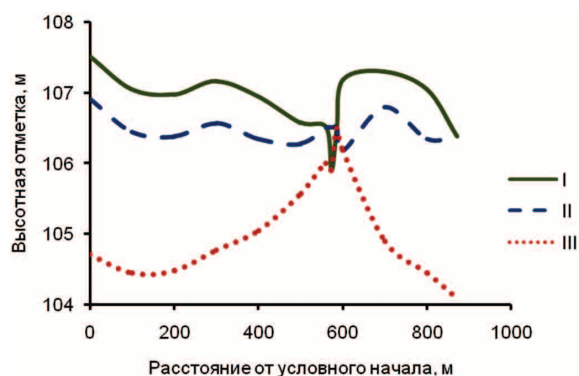


Рис. 4. Профиль долины вторичного внутриболотного водотока в верховьях р. Тром-Юган: I) высотная отметка поверхности водосбора в Балтийской системе высот; II) уровень болотных вод (в русле – речных); III) высотная отметка минерального основания болота

В настоящее время в регионе отмечаются весьма значительные скорости прироста торфяной залежи (табл. 1) и расширения болот. Так, по данным М.И. Нейштадта [2], речь идёт о ежегодном приросте площади болот на десятки тысяч гектаров, причём интенсивность болотообразования увеличивается после лесных пожаров и строительства на болотах вследствие уменьшения эвапотранспирации и замедления поверхностного и подповерхностного стока у линейных сооружений (дорог, трубопроводов) и объектов нефтегазодобычи.

Таблица 1. Интенсивность торфонакопления в Западной Сибири [22]

Объект	Прирост торфяной залежи, мм/год	Аккумуляция $C_{орг.}$, г/год·м ²
Верховая сфагновая залежь Васюганского болота	1,15 (от 0,60 до 2,62)	39,7
Низинная травяная залежь Васюганского болота	0,59	30,1
Васюганское болото в целом	–	30...40
Болота Западной Сибири в целом	от 0,39 до 0,80	–

Для более полного раскрытия роли гидрологических процессов была разработана математическая модель формирования месячного водного стока на заболоченных территориях. Её структура подробно описана в [10, 11]. Здесь лишь отметим, что модель включает в себя расчёт испарения с поверхности водосбора методами М.И. Будыко и В.С. Меженцева, оценку снеготаяния по температурным коэффициентам и определение инфильтрации и подземной составляющей стока по авторской методике, основанной на оптимизации параметров уравнения водного баланса и использовании упрощённой модели инфильтрации Грина-Эмптона. Расчёт перераспределения водного стока внутри болотной экосистемы выполнен на основе предложений К.И. Иванова, исходя из допущения относительного постоянства проточности определённых видов внутриболотных экосистем.

Анализ результатов математического моделирования, частично опубликованных в [8–11], показал, что, во-первых, основная часть руслового стока при высокой заболоченности водосбора связана со снеготаянием. Дождевые осадки, несмотря на их преобладание в годовом атмосферном увлажнении, преимущественно расходятся на испарение.



Рис. 5. Фрагмент водосбора р. Васюган на участке нижнего течения; фото С.В. Паромова

Во-вторых, наблюдаемое в последние десятилетия увеличение меженного речного стока и подземной составляющей суммарного стока [23–26] в ряде случаев удовлетворительно объясняется смещением сроков установления снегового покрова и снеготаяния, снижением испарения с поверхности водосборов при уменьшении температур воздуха в летний период и увеличением температуры в остальные месяцы года даже при отсутствии изменений годового атмосферного увлажнения.

В-третьих, на примере водосбора реки Ключ (элемент речной системы Ключ–Бакчар–Чая–Обь) установлено, что на границе грядово-мочажинно-озеркового и олиготрофного сосново-сфагново-кустарничкового («рям») болот, а также олиготрофного сосново-сфагново-кустарничкового и мезотрофного болот наблюдается относительно резкое уменьшение слоя стока (табл. 2).

Можно предположить, что количественные оценки элементов водного баланса других речных водосборов могут отличаться от указанных в табл. 2, но основной механизм взаимного влияния гидрологических и болотных процессов во многих случаях будет таким же, что для р. Ключ:

- 1) болота разного типа и вида характеризуются различными гидрологическими условиями (уклонами водной поверхности, средними значениями мощности торфяной залежи, коэффициентов фильтрации и испарения), определяющими более высокий водный сток в грядово-мочажинно-озерковых комплексах по сравнению с сосново-сфагново-кустарничковыми, а также во многих олиготрофных болотах по сравнению с их окрайкой и мезотрофными болотами;
- 2) создаются постоянные условия переувлажнения территории на границе грядово-мочажинно-озерковых и сосново-сфагново-кустарничковых болот, олиготрофных и мезотрофных болот, олиготрофных болот и залесенных незаболоченных участков, приводящие к расширению первого компонента из перечисленных выше пар (за счёт второго).

Таблица 2. Элементы годового водного баланса реки Ключ в северо-восточной части Васюганского болота в среднем за многолетний период, мм

Экосистема	Водный сток	Испарение с поверхности водосбора
Олиготрофное болото грядово-мочажинно-озерковое	85	398
Олиготрофное болото сосново-сфагново-кустарничковое («рям»)	64	419
Мезотрофное болото	20	463
Открытые территории (гари, вырубки, поляны)	21	462
Смешанный лес	43	448
Водосбор в целом	68	417

Примечание: направление стока в водосборе р. Ключ – от грядово-мочажинно-озерковых к мезотрофным (через «рям»); открытые участки расположены внутри смешанного леса [9]

Следует отметить, что большое значение в современном заболачивании в Западной Сибири играет не только средний уровень увлажнения, испарения и стока, но и временная изменчивость элементов водного баланса. В частности, незначительный водный сток малых водотоков (первого–третьего порядков) не препятствует, а в маловодные годы даже способствует зарастанию их русел гидрофильной растительностью, появление которой, в свою очередь, способствует увеличению коэффициентов шероховатости и увеличению уровней речных вод в периоды повышенной водности. Соответственно, возрастают уровни грунтовых вод, гидравлически связанных с речными, меняется окислительно-восстановительная обстановка в почвенном горизонте (за счёт изменения кислородного режима) и дополнительно создаются более благоприятные условия для распространения гидрофильной растительности.

При некоторых условиях, определяемых в значительной степени видовым составом и возрастной структурой древесной растительности [27–29], испарение с поверхности подобных участков перестаёт компенсировать накопление влаги, а на них развивается уже болотная растительность. При этом существующая речная сеть начинает деградировать, а в периоды повышенной водности избытки влаги могут сбрасываться по краевым участкам, что может вызывать усиленную деформацию почвогрунтов и способствовать формированию новой русловой сети с последующим повторением описанного выше механизма и расширения границ заболоченной территории.

Выводы

Выявлен и количественно обоснован механизм взаимосвязей между процессами формирования водного стока, возникновения и эволюции болот в таёжной зоне Западной Сибири на уровне водосборов водотоков первого и второго порядков. Показано, что в настоящее время болотообразование начинается и/или развивается в условиях затруднённого водного стока на фоне избыточного или нормального увлажнения, причём важны не только абсолютные значения стока, но и его изменчивость, как в пределах многолетнего периода, так и внутри года.

С учётом этого можно утверждать, что, *во-первых*, сильная изменчивость водного стока и уровней воды в многолетнем разрезе и в течение года, а также развитие русловых процессов по типу свободного меандрирования, русловой и пойменной многорукавности способствует заболачиванию речных долин и водосборов на фоне избыточного атмосферного увлажнения и незначительных уклонов поверхности, причём важную роль в увеличении изменчивости уровней воды и степени затопления поймы в Сибири играют ледовые заторы и зажоры, наблюдаемые на многих реках подтаёжной и южнотаёжной подзон [8].

Во-вторых, хозяйственная деятельность, связанная с приоритетным развитием нефтегазового комплекса, может в отдельных случаях препятствовать процессу болотообразования (при проведении дополнительных мероприятий по осушению болот), но чаще всего способствует заболачиванию за счёт ухудшения поверхностного и подземного стока вследствие переобводнения участков, примыкающих к автодорогам, трубопроводам и промышленным площадкам.

При этом общая структура механизма антропогенного заболачивания выглядит так же, как и

природного, а именно: 1) внутри экосистемы есть участки с различной интенсивностью водообмена; 2) участки с более интенсивным водным стоком расположены в начале миграционных путей, что приводит к переобводнению пограничных участков и расширению участков с гидрофильной растительностью; 3) накопление влаги на пограничных участках вызывает необратимые изменения во всей системе, связанные с появлением болотной растительности и накоплением торфа.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-05-98045 р_сибирь_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- L'gotin V.A., Savichev O.G. Scale estimation and intensity of exogenous geological processes in Western Siberia with use of the remote data (by the example of Tomsk region, Russia) // GIS in geology and earth sciences: 4th Intern. Conf.: AIP Proc. – N.Y.: Amer. Inst. of Physics, 2008. – V. 1009. – P. 212–220.
- Нейштадт М.И. Болота Обь-Иртышского междуречья // Природные условия освоения междуречья Обь-Иртышья. – М.: ИГАН СССР, 1972. – С. 322–346.
- Нейштадт М.И. Возникновение и скорость развития процесса заболачивания // Научные предпосылки освоения болот Западной Сибири. – М.: Наука, 1977. – С. 39–48.
- Караваева Н.А. Типы и механизмы современного заболачивания почв в лесной зоне // Научные предпосылки освоения болот Западной Сибири / отв. ред. М.И. Нейштадт. – М.: Наука, 1977. – С. 124–137.
- Болота Западной Сибири. Их строение и гидрологический режим / под ред. К.Е. Иванова, С.М. Новикова. – Л.: Гидрометеоздат, 1976. – 447 с.
- Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А. и др. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. – Тула: Изд-во «Гриф и Ко», 2001. – 584 с.
- Березин А.Е., Базанов В.А., Савичев О.Г. Принципы разработки кадастра торфяных болот (на примере районов нефтедобычи Томской области) // Охрана природы. Вып. 3: Сб. статей / под ред. А.Е. Березина. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – С. 13–26.
- Савичев О.Г. Водные ресурсы Томской области. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 248 с.
- Савичев О.Г., Скугарев А.А., Базанов В.А., Харанжевская Ю.А. Водный баланс заболоченных водосборных территорий Западной Сибири (на примере малой реки Ключ, Томская область) // Геоинформатика. – 2011. – № 3. – С. 39–46.
- Савичев О.Г., Бернатонис П.В., Бернатонис В.К. Гидрологическое обоснование хозяйственного освоения торфяных болот (на примере водосбора реки Ключ, Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 155–162.
- Савичев О.Г. Методика оценки антропогенного воздействия на водный сток рек таежной зоны (на примере притоков Средней Оби) // Инженерные изыскания. – 2012. – № 7. – С. 14–20.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Ч. 1. – Л.: Гидрометеоздат, 1978. – 382 с.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 8. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 360 с.
- Технический регламент Всемирной метеорологической организации № 49. Т. III. Гидрология. – Женева: Секретариат ВМО, 2006. – 72 с.
- Bazanov V.A., Berezin A.E., Savichev O.G., Skugarev A.A. The phytoidication method for mapping peatlands in the taiga zone of the West-Siberian Plain // International Journal of Environmental Studies. – 2009. – V. 66. – № 4. – P. 473–484.
- Малолетко А.М. Эволюция речных систем Западной Сибири в мезозое и кайнозое. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2008. – 288 с.
- Инишева Л.И., Земцов А.А., Лисс О.Л. и др. Васюганское болото. Природные условия, структура и функционирование / под ред. Л.И. Инишевой. – Томск: ЦНТИ, 2003. – 212 с.
- Inisheva L.I., Zemtsov A.A., Novikov S.M. Vasugan Mire / ed. L.I. Inisheva. – Tomsk: TSPU Press, 2011. – 160 p.
- Савичев О.Г. Оценка русловых деформаций в бассейнах рек Васюган и Парабель (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 1. – С. 82–87.
- Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Laces // Science. – 2005. – V. 308. – № 3. – P. 1429.
- Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Геоимитационные модели полей термокарстовых озёр в зонах мерзлоты. – Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ, 2013. – 129 с.
- Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д. Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2002. – С. 174–179.
- Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Rawlins M.A., Smith L.C., Pavelsky T.M. Temporal and spatial variations in maximum river discharge from a new Russian data set // Journal of Geophysical Research. – 2007. – V. 112, G04S53. – P. 1–14.
- Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettermaier D.P. et al. Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences. Ch. 4. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. (Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman). – Dordrecht; Heidelberg; NY; London: Springer, 2013. – P. 111–154.
- Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2010 г. / под ред. В.А. Лыготина. – Томск: ОАО «Томскгеомониторинг», ООО «СтандАрт», 2011. – 144 с.
- Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2011 г. / Под ред. В.А. Лыготина. – Томск: ОАО «Томскгеомониторинг», ООО «СтандАрт», 2012. – 180 с.
- Кузнецов В.И., Козлов Н.И., Хомяков П.М. Математическое моделирование эволюции леса для целей управления лесным хозяйством. – М.: ЛЕНАНД, 2005. – 232 с.
- Бляхарчук Т.А. Палеорекострукция климатических изменений на территории Большого Васюганского болота с использованием метода В.А. Климанова // Исследование природно-климатических процессов на территории Большого Васюганского болота / под ред. М.В. Кабанова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – С. 8–14.
- Прейс Ю.И., Курьина И.В. Палеорекострукция высокого разрешения по данным комплексного исследования торфяных отложений южной тайги Западной Сибири // Исследование природно-климатических процессов на территории Большого Васюганского болота / под ред. М.В. Кабанова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – С. 14–40.

Поступила 01.11.2013 г.

UDC 550.42:577.4(571.1)

HYDROLOGICAL ASPECTS OF BOGS FORMATION IN TAIGA ZONE OF WESTERN SIBERIA

Oleg G. Savichev,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: OSavichev@mail.ru

Sergey V. ParomonoV,

Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30;
Open joint company «Vozhsky podvodnik», Tomsk department,
Russia, 644033, Omsk, Khimikov street, 8. E-mail: ramondasilva@mail.ru

Urgency: Absence of satisfactory answers to a lot of questions of interrelations between formation of bogs, water and sediment flow, change of river channels limits the reliability of long-term forecasts of environmental changes in boggy territories of Western Siberia and estimations of anthropogenous influence on bog ecosystems. It results in many cases in amplification of water negative influence and occurrence of extreme situations, including the objects of an oil-and-gas complex.

The purpose of the study is to reveal the most common mechanisms of river and marsh systems interference described by prevalence of substance erosion and accumulation processes opposite in their influence on environment.

Methods of research: a geographic-hydrological method, mathematical modelling of hydrological processes.

Results and abstracts: The authors have revealed and quantitatively proved the mechanism of interrelation between the processes of water runoff formation, occurrence and evolution of bogs in taiga zone of Western Siberia (at a level of basins of river of the first – third orders). Currently under conditions of superfluous or normal humidifying the bogging begins in conditions of the complicated water runoff on a background of superfluous humidifying. The authors found out that not only the absolute values of a runoff, but also its variability both within the limits of the long-term period, and inside one year play the important role. The conclusion was drawn that economic activities connected to priority development of an oil-and-gas complex, can promote bogging owing to deterioration of a superficial and earth drain on sites at engineering systems and constructions.

Key words:

Hydrological analysis, hydrological processes, formation of bogs, Western Siberia, water balance.

REFERENCES

1. Lgotin V.A., Savichev O.G. Scale estimation and intensity of exogenous geological processes in Western Siberia with use of the remote data (by the example of Tomsk region, Russia). *GIS in geology and earth sciences: 4th Intern. Conf.: AIP Proc.* N.Y., Amer. Inst. of Physics, 2008, vol. 1009, pp. 212–220.
2. Neishtadt M.I. Bolota Ob-Irtyshskogo mezdurechya [Marshes of Ob-Irtysh interfluvial]. *Prirodnye usloviya osvoeniya mezdurechya Ob-Irtysha* [The natural conditions of the development of the Ob-Irtysh interfluvial]. Moscow, IG AS USSR, 1972. pp. 322–346.
3. Neishtadt M.I. Vozniknovenie i skorost razvitiya protsessa zabolachivaniya [The emergence and development speed of the process of bogging]. *Nauchnye predposylki osvoeniya bolot Zapadnoy Sibiri* [Scientific Background of swamps development in Western Siberia]. Moscow, Nauka, 1977. pp. 39–48.
4. Karavaeva N.A. Tipy i mekhanizmy sovremennogo zabolachivaniya pochv v lesnoy zone [Types and mechanisms of modern bogging of soils in the forest zone]. *Nauchnye predposylki osvoeniya bolot Zapadnoy Sibiri* [Scientific Background of swamps development in Western Siberia]. Moscow, Nauka, 1977. pp. 124–137.
5. Bolota Zapadnoy Sibiri. Ikh stroenie i gidrologicheskiy rezhim [Bogs in Western Siberia. Their structure and hydrology]. Eds. K.E. Ivanova, S.M. Novikova. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976. 447 p.
6. 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 Ko, 2001. 584 p.
7. Berezin A.E., Bazanov V.A., Savichev O.G. Printsipy razrabotki kadastra torfyanykh bolot (na primere rayonov nefte dobychi Tomskoy oblasti) [Principles for the development of the inventory of peat bogs (for example, oil-producing areas of the Tomsk region)]. *Okhrana prirody*, Iss. 3. Tomsk, NTL Publ., 2005, pp. 13–26.
8. Savichev O.G. *Vodnye resursy Tomskoy oblasti* [Water resources of the Tomsk region]. Tomsk, TPU Publ., 2010. 248 p.
9. Savichev O.G., Skugarev A.A., Bazanov V.A., Kharanzhevskaya Yu.A. Vodny balans zabolochennykh vodosbornykh territoriy Zapadnoy Sibiri (na primere maloy reki Klyuch, Tomskaya oblast) [Water balance of the wetland catchment area in West Siberia (on the example of the small river Key, Tomsk region)]. *Geoinformatika*, 2011, no. 3, pp. 39–46.
10. Savichev O.G., Bernatonis P.V., Bernatonis V.K. Gidrologicheskoe obosnovanie khozyaystvennogo osvoeniya torfyanykh bolot (na primere reki Klyuch, Zapadnaya Sibir) [Hydrological rationale of economic development in peat bogs (by the example of key watershed, Western Siberia)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 155–162.
11. Savichev O.G. Metodika otsenki antropogennogo vozdeystviya na vodny stok rek taizhnoy zony (na primere pritokov Sredney Obi) [Methods of assessing human impact on the water flow of the rivers of the taiga zone (by the example of tributaries of the Middle Ob)]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2012, no. 7, pp. 14–20.
12. *Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam* [Manual for hydrometeorological stations and posts]. Vol. 6. Ch. 1. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978. 382 p.
13. *Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam* [Manual for hydrometeorological stations and posts]. Vol. 8. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 360 p.
14. *Tekhnicheskii reglament Vsemirnoy meteorologicheskoy organizatsii* [Technical Regulations of the World Meteorological Organization]. Geneva, Secretariat WMO, 2006, no. 49, vol. III. Hydrology, 72 p.
15. Bazanov V.A., Berezin A.E., Savichev O.G., Skugarev A.A. The phytoindication method for mapping peatlands in the taiga zone of the West-Siberian Plain. *International Journal of Environmental Studies*, 2009, vol. 66, no. 4, pp. 473–484.
16. Maloletko A.M. *Evolutsiya rechnykh sistem Zapadnoy Sibiri v mezozoe i kaynozoe* [Evolution of the river systems of Western

- Siberia in the Mesozoic and Cenozoic]. Tomsk, TGU Publ., 2008. 288 p.
17. Inisheva L.I., Zemtsov A.A., Liss O.L. *Vasyuganskoe boloto. Prirodnye usloviya, struktura i funktsionirovanie* [Vasyugan Bog. The natural conditions of the structure and functioning]. Tomsk, CSTP, 2003. 212 p.
 18. Inisheva L.I., Zemtsov A.A., Novikov S.M. *Vasugan Mire*. Tomsk, TSPU Press, 2011. 160 p.
 19. Savichev O.G. Otsenka ruslovykh deformatsiy v basseynakh rek Vasyugan i Parabel (Zapadnaya Sibir) [Evaluation of channel deformations in the river basins Vasyugan and Parabel (Western Siberia)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 313, no. 1, pp. 82–87.
 20. Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Laces. *Science*. 2005, vol. 308, no. 3, pp. 1429.
 21. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. *Geoimitatsionnye modeli polei termokarstovykh ozer v zonakh merzloty* [Geo-simulation models of fields of thermokarst lakes in permafrost areas]. Khanty-Mansiysk, UIP YUSU, 2013. 129 p.
 22. Pologova N.N., Lapshina E.D. Nakoplenie ugleroda v torfyanykh zalezakh Bolshogo Vasuganskogo bolota [The accumulation of carbon in peat bog deposits of the Great Vasyugan]. *Bolshoe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development processes]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publishing, 2002. pp. 174–179.
 23. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Rawlins M.A., Smith L.C., Pavelsky T.M. Temporal and spatial variations in maximum river discharge from a new Russian data set. *Journal of Geophysical Research*, 2007, vol. 112, G04S53, pp. 1–14.
 24. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettermaier D.P. *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences. Ch. 4. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections* (Eds. P.Ya. Groisman, G. Guttman). Dordrecht; Heidelberg; New York; London, Springer, 2013, pp. 111–154.
 25. *Sostoyanie geologicheskoy sredy (nedr) territorii Sibirskogo federalnogo okruga v 2010 g.* [State of geological environment (interior), the Siberian Federal District in 2010]. Ed. V.A. Lgotin. Tomsk, Tomskgeomonitoring, StandArt, 2011. 144 p.
 26. *Sostoyanie geologicheskoy sredy (nedr) territorii Sibirskogo federalnogo okruga v 2011 g.* [State of the geological environment (interior), the Siberian Federal District in 2011]. Ed. V.A. Lgotin. Tomsk, Tomskgeomonitoring, StandArt, 2012. 180 p.
 27. Kuznetsov V.I., Kozlov N.I., Khomyakov P.M. *Matematicheskoe modelirovanie evolyutsii lesa dlya tseley upravleniya lesnym khozyaystvom* [Mathematical modeling of forest evolution for forest management]. Moscow, LENAND, 2005. 232 p.
 28. Blyakharchuk T.A. Paleorekonstruktsiya klimaticheskikh izmeneniy na territorii Bolshogo Vasuganskogo bolota s ispolzovaniem metoda V.A. Klimanova [Paleoreconstruction of climate change in the Great Vasyugan bog using the method of V.A. Klimanov]. *Issledovanie prirodno-klimaticheskikh protsessov na territorii Bolshogo Vasuganskogo bolota* [The study of natural and climatic processes in the Great Vasyugan bog]. Ed. M.V. Kabanov. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2012. pp. 8–14.
 29. Preys Yu.I., Kurina I.V. Paleorekonstruktsiya vysokogo razresheniya po dannym kompleksnogo issledovaniya torfyanykh otlozheniy yuzhnoy taygi Zapadnoy Sibiri [Paleoreconstruction of high definition by the data of comprehensive study of peat deposits in southern taiga in West Siberia]. *Issledovanie prirodno-klimaticheskikh protsessov na territorii Bolshogo Vasuganskogo bolota* [The study of natural and climatic processes in the Great Vasyugan bog]. Ed. M.V. Kabanov. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2012. pp. 14–40.

Технология и техника геологоразведочных работ

УДК 621.643

ВЛИЯНИЕ КООРДИНАТ УСТАНОВКИ УСТРОЙСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В НЕФТЕПРОВОДЕ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УТЕЧКИ

Мамонова Татьяна Егоровна,

канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры интегрированных
компьютерных систем управления Института кибернетики ТПУ, Россия,
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: mamte@sibmail.com

Предложен метод определения координаты и массового расхода утечки. Данный метод основан на анализе показаний средств измерения давления, расположенных в начале и конце трубы, а также вдоль трубопровода. Описаны формулы для расчета координаты и массового расхода утечки в соответствии с предложенным модифицированным методом гидравлической локации. Выполнены экспериментальные исследования метода и расчетных формул на трубопроводе для перекачки летнего дизельного топлива. Показана возможность практического применения описанных формул по предложенному методу для определения параметров утечки на магистральных трубопроводах. В ходе анализа результатов проведенного эксперимента были установлены зависимости погрешностей расчёта координат и массового расхода утечки от местоположений устройств измерения давления в трубопроводе.

Ключевые слова:

Нефтепровод, утечка в нефтепроводе, устройство измерения давления, профиль трубопровода, тренд давления, размещение датчиков давления.

Трубопроводный транспорт является самым распространенным и эффективным в нефтяной промышленности, особенно при доставке нефтепродуктов из труднодоступных мест добычи. Важно обеспечивать целостность трубопроводов, так как нарушение их герметичности ведет к большим экономическим и экологическим проблемам вследствие их прорывов либо несанкционированных врезок. В настоящее время существует большое количество методов периодического контроля и постоянного мониторинга трубопроводов. Все они основаны на различных физических явлениях и позволяют определять местоположение утечки с различной точностью [1–4].

С целью повышения точности определения координаты и массового расхода утечки из трубопроводов автором предложен метод определения утечки, основанный на анализе гидравлического профиля эксплуатируемого участка нефтепровода [5]. Данный гидравлический профиль строится по показаниям разработанных автором устройств, описанных в [6] и предназначенных для определения изменения во времени давления в четырёх контролируемых сечениях трубы. При этом средства измерения давления располагаются вдоль трубы в её

четырёх сечениях. Указанный метод является улучшенной модификацией метода гидравлической локации, который предложен в [7].

Формулы для определения координаты и массового расхода утечки в соответствии с предложенным методом имеют вид [5]:

$$\xi = \frac{\begin{pmatrix} (x_2 - x_1)(x_4 \Delta P_3 - x_3 \Delta P_4) - \\ -(x_4 - x_3)(x_2 \Delta P_1 - x_1 \Delta P_2) \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} (x_2 - x_1)(\Delta P_3 - \Delta P_4) + \\ +(x_4 - x_3)(\Delta P_2 - \Delta P_1) \end{pmatrix}}, \quad (1)$$

$$G_T = \frac{\pi d^2}{16} \sqrt{2d\rho} \times \left[\frac{1}{\lambda_1} \times \sqrt{\frac{P_1 - P_4 + \rho g(z_1 - z_4)}{x_4 - x_1} + \frac{\Delta P_2(\Delta P_2 - \Delta P_1)}{x_2(\Delta P_2 - \Delta P_1) - x_1 \Delta P_2 + x_2 \Delta P_1}} \right] - \frac{1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{P_1 - P_4 + \rho g(z_1 - z_4)}{x_4 - x_1}}, \quad (2)$$

где ΔP_n – разность во времени давления в контролируемых сечениях трубопровода [Па]; x_n – координаты установки устройства для измерения разности во времени давления [м]; z_n – геометрический профиль трубопровода [м]; $n=1...4$ – количество устройств определения разности во времени давления; P_1, P_4 – абсолютное давление в первом и четвертом контролируемых сечениях трубы [Па]; d – внутренний диаметр трубы [м]; $\lambda=\lambda(Re, \varepsilon)$ – коэффициент гидравлического сопротивления трубопровода, является безразмерной величиной; $Re=(wd)/\nu$ – число Рейнольдса; ε – относительная шероховатость внутренней поверхности нефтепровода; w – скорость перекачки нефтепродукта по сечению [м/с]; ν – кинематическая вязкость нефтепродукта [м²/с]; λ_1, λ_2 – коэффициенты гидравлического сопротивления до и после возникновения утечки, соответственно, являются безразмерными величинами.

Исследование расчётных формул (1) и (2) модельным методом было проведено в [5].

В зависимости от местоположения устройств, измеряющих изменения во времени давления в контролируемых сечениях нефтепровода, возможно изменение точности определения параметров утечки, а также чувствительности к появлению малых утечек. В соответствии с разработанным методом, утечка может быть обнаружена в случае её появления между вторым и третьим датчиками давления. Существенным недостатком метода является наличие неконтролируемых зон, расположенных между нефтеперекачивающими станциями и вторым датчиком в начале трубы и третьим датчиком в конце трубы. Задачей исследования в рамках данной работы является установление возможности уменьшения данных зон и сохранения чувствительности метода к малым утечкам. Для этого необходимо рассмотреть влияние расположения устройств определения изменения во времени давления на точность определения параметров утечки.

При этом были взяты данные эксперимента, проводимого на нефтепроводе транспортировки лет-

него дизельного топлива плотностью $\rho=860$ кг/м³. Утечка имитировалась открытием крана, интенсивность регулировалась различным диаметром шайбы $d_{ш}$. Диаметр трубы составлял $d=0,530$ м, отбор нефтепродукта выполнялся в месте с координатой $\xi=125,71 \cdot 10^{-3}$ м при $d_{ш}=10 \cdot 10^{-3}$ м и $d_{ш}=20 \cdot 10^{-3}$ м.

Схема нефтепровода и датчиков давления, расположенных в четырёх сечениях трубы, представлена на рис. 1. Данная схема содержит следующие вспомогательные обозначения: Δx_1 – расстояние между первым и вторым датчиками давления, Δx_2 – расстояние между третьим и четвертым датчиками давления, Δx_{12} – контролируемая зона нефтепровода, определяемая расстоянием между вторым и третьим датчиками давления.

На испытательном участке работающего трубопровода располагаются две системы определения утечек, каждая из которых имеет набор датчиков абсолютного давления, установленных вдоль трубы. В соответствии с этим при проведении эксперимента было выбрано четыре варианта расположения датчиков давления вдоль трубы так, как это указано в табл. 1.

Все данные были обработаны в соответствии со структурой, представленной на рис. 2.

Расчёт параметров утечки был проведён по формулам (1) и (2). Результаты расчётов представлены в табл. 2. При этом значения массового расхода утечки были рассчитаны с использованием формулы [8]:

$$G_T = \rho \mu \frac{\pi d_{ш}^2}{4} \cdot \sqrt{2gH_{\xi}}, \quad (3)$$

где μ – коэффициент расхода (принят равным 1); H_{ξ} – значение гидравлического напора в месте утечки, м; $d_{ш}$ – диаметр шайбы, м.

Погрешности расчёта координаты $\delta \xi$ и массового расхода δG_T утечки рассчитаны по формулам:

$$\delta \xi = \frac{|\xi_p - \xi_s|}{\xi_s} \cdot 100 \%, \quad \delta G_T = \frac{|G_{Tp} - G_{Ts}|}{G_{Ts}} \cdot 100 \%,$$

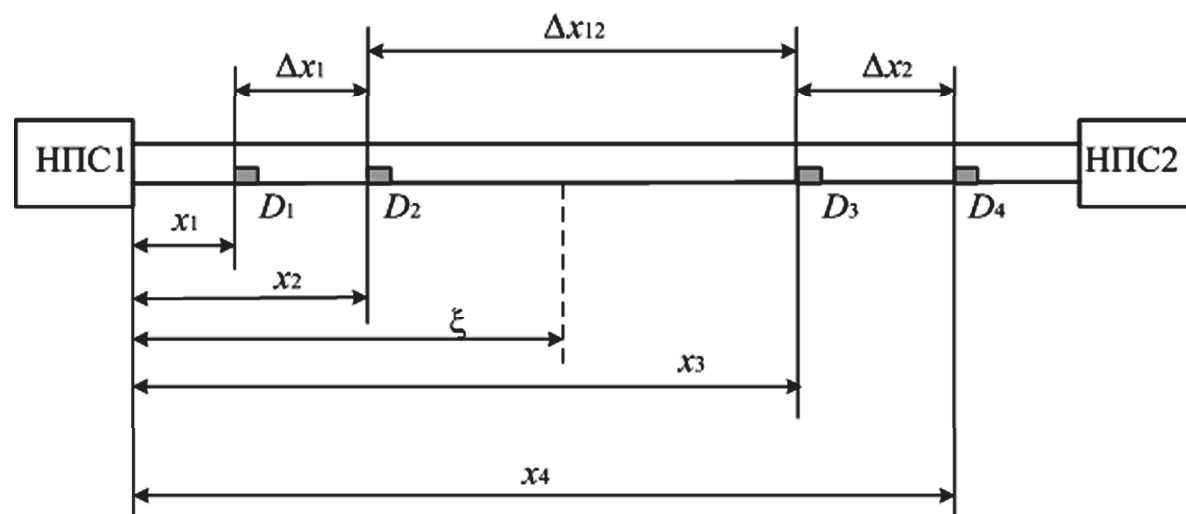
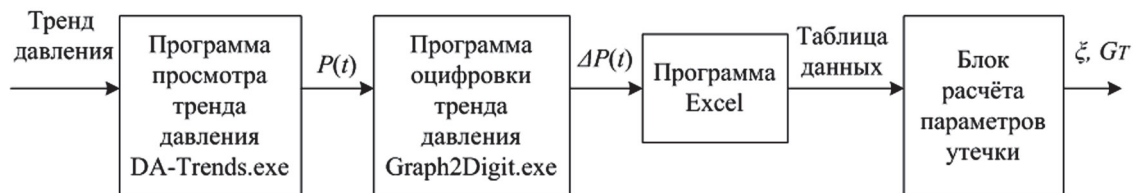


Рис. 1. Схема расположения датчиков давления на нефтепроводе с утечкой при экспериментальном исследовании

Таблица 1. Координаты расположения четырёх датчиков давления на нефтепроводе с утечкой и расстояния между ними

Координаты установки датчиков давления, м				Расстояния между датчиками давления, м		
x_1	x_2	x_3	x_4	Δx_1	Δx_2	Δx_{12}
27 339,49	28 139,49	149 636,40	150 480,12	800	844	121 497
27 339,49	28 139,49	143 692,00	150 480,12	800	6 788	115 553
27 339,49	90 279,93	149 636,40	150 480,12	62 940	844	59 359
27 339,49	90 279,93	143 864,52	150 480,12	62 940	6 616	53 585
90 279,93	91 077,42	143 692,00	143 864,52	797	173	52 614

**Рис. 2.** Структура для обработки данных

где ξ_p, G_{Tp} – расчётные значения координаты и массового расхода утечки, полученные по формулам (1) и (2); ξ_s, G_{Ts} – эталонные значения координаты и массового расхода, полученные экспериментальным путём.

Таблица 2. Результаты расчёта параметров утечки модифицированным методом гидравлической локации при вариации координат установки датчиков давления

Заданные значения	Расчётные значения		Погрешности расчёта			
	$\xi \cdot 10^3$, м	G_T , кг/ч	$\Delta \xi$, м	δ_ξ , %	ΔG_T , кг/ч	δ_{G_T} , %
$\xi=125,71 \cdot 10^3$, м $d_{ш}=20 \cdot 10^{-3}$, м $G_T=19,274$, кг/ч	125,325	16,500	438	0,349	2,774	14,394
	125,627	16,500	83	0,066	2,774	14,394
	125,975	22,667	265	0,211	3,393	17,605
	125,706	19,055	4	0,003	0,219	1,136
	125,758	17,050	48	0,038	2,224	11,539
$\xi=125,71 \cdot 10^3$, м $d_{ш}=10 \cdot 10^{-3}$, м $G_T=10,868$, кг/ч	126,197	9,023	487	0,387	1,845	16,976
	125,572	9,023	138	0,110	1,845	16,976
	126,032	13,032	322	0,256	3,381	19,913
	125,694	9,813	16	0,013	1,055	9,704
	125,772	12,132	62	0,049	1,264	11,632

Результаты экспериментального исследования, указанные в табл. 2, показали, что формулы для определения местоположения и массового расхода утечки из трубопровода (1) и (2) применимы на практике. Установлено, что точность определения параметров утечки зависит от координат установки устройств измерения давления, а также от их сочетания. Наилучшая точность определения координаты утечки и массового расхода (при $\delta \xi=0,003$ % и $\delta G_T=0,211$ %) наблюдается при наибольших из представленных расстояний $\Delta x_1, \Delta x_2$ и наименьшем расстоянии контролируемого участка нефтепровода Δx_{12} . При уменьшении интенсивности утечки точность определения параметров утечки ухудшается, однако тенденция её улучшения наблюдается при сокращении зоны Δx_{12} .

Графики зависимости погрешности расчёта координаты утечки δ_ξ и массового расхода утечки δ_{G_T} от расстояния между датчиками давления Δx_2 при $\Delta x_1=\text{const}$ представлены на рис. 3.

По графикам, представленным на рис. 3, а, установлено, что при фиксированном расстоянии между первым и вторым датчиками давления Δx_1 наилучшая точность расчёта координаты утечки достигается при наименьшем расстоянии между третьим и четвёртым датчиками Δx_2 . Указанная на рисунке зависимость нелинейная, так как погрешность расчёта координаты утечки по формуле (2) зависит от многих факторов. Поэтому можно наблюдать уменьшение погрешности определения координаты утечки при приближении утечки к местоположению третьего датчика давления. Заметим также, что погрешность расчёта координаты утечки зависит и от интенсивности утечки, которая изменяется в зависимости от диаметра шайбы. При этом увеличение $d_{ш}$ в два раза ведёт к увеличению точности расчёта координаты утечки минимум на 0,011 %.

Из графиков, представленных на рис. 3, б, видно, что при фиксированном расстоянии между первым и вторым датчиками давления Δx_1 точность расчёта массового расхода утечки увеличивается при уменьшении расстояния между третьим и четвёртым датчиками Δx_2 . Указанная зависимость является нелинейной, так как погрешность расчёта массового расхода утечки по формуле (3) зависит от расстояния между возникшей утечкой и местоположениями датчиков давления, а также от точности датчиков абсолютного давления в месте расположения первого и четвёртого датчиков давления. Погрешность определения массового расхода утечки не зависит от местоположения третьего и четвёртого датчиков давления при постоянных координатах установки первого и второго датчиков. Погрешность расчёта массового расхода утечки зависит также от интенсивности утечки. При увеличении диаметра отверстия утечки от 0,01 до 0,02 м погрешность расчёта увеличивается минимум на 0,093 %.

Следует отметить, что при экспериментальных исследованиях использовались показания датчиков абсолютного давления, что повлияло на точ-

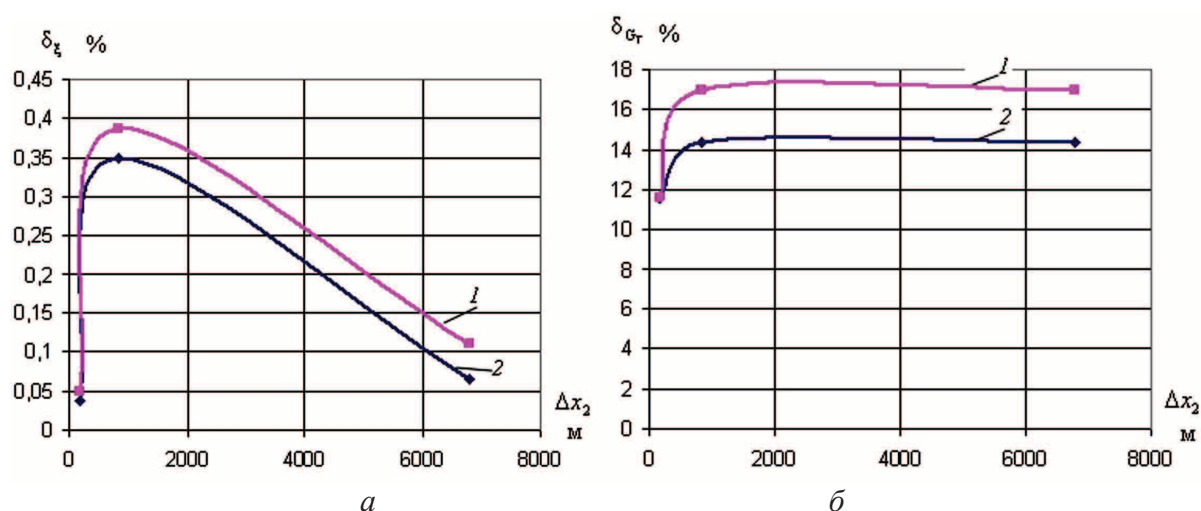


Рис. 3. Графики зависимостей погрешности расчёта а) координаты утечки; б) массового расхода утечки от расстояний между датчиками давления $\delta_\xi(\Delta x_2)$ при $\Delta x_1=800$ м и диаметре шайбы: 1) $d_{ш}=10 \cdot 10^{-3}$ м; 2) $d_{ш}=20 \cdot 10^{-3}$ м

ность определения изменения во времени давления в контролируемых сечениях и, следовательно, отразилось на точности расчёта параметров утечки.

Выводы

Таким образом, для достижения наибольшей точности определения координаты и массового расхода утечки по модифицированному методу гидравлической локации утечки и соответствующим ему расчётным формулам (1) и (2), а также для увеличения при этом контролируемой зоны трубопровода нужно устанавливать средства измерения да-

вления так, чтобы расстояния между первым и вторым устройствами Δx_1 и между третьим и четвёртым Δx_2 были наименьшими, так чтобы чувствительность измерительных устройств позволяла определять изменения давлений выше шумов в трубе. Расположение устройств измерения изменения во времени давления будет также зависеть от их точности и чувствительности.

Для установления характера влияния погрешности измерения давления в трубопроводе на точность определения параметров утечки по предложенному методу необходимо провести дополнительные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gerhard G. Principles of Leak Detection // Fundamentals of Leak Detection. Krohne. Oil & Gas. 2003. – P. 1–48. URL: http://krohne.com/fileadmin/files-2/PipePatrol/KROHNE_Gerhard_Geiger_Principles_of_Leak_Detection_2012.pdf (дата обращения: 26.12.2012).
2. Kelvin T. Erickson, E. Keith Stanek, Miller A. Reliability of Pressure Signals in Offshore Pipeline Leak Detection. – Rolla: University of Missouri-Rolla, 2004. – P. 1–85.
3. Gorny M. Monitoring acoustic noise in steel pipelines // Proceedings of IPC2008 7th International Pipeline Conference. – Calgary, 2008. – P. 123–135.
4. Трубопроводный транспорт нефти / под ред. С.М. Вайнштока. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – Т. 2. – 621 с.
5. Мамонова Т.Е. Метод определения утечки из нефтепровода, основанный на разности во времени давления // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 216–219.
6. Лурье М.В., Макаров П.С. Гидравлическая локация утечек нефтепродуктов на участке трубопровода // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 1998. – № 12. – С. 65–69.
7. Мамонова Т.Е. Обнаружение утечек из нефтепровода с использованием устройства для измерения изменений давления // Наука Красноярья. – 2012. – № 5 (05). – С. 102–112.
8. Кононов А.А. Истечение через малые отверстия в тонкой стенке при постоянном напоре // Образовательный ресурс по гидродинамике и гидропневмоприводе. 2011. URL: <http://gidravl.narod.ru/istechenie.html> (дата обращения: 26.12.2012).

Поступила 25.06.2013 г.

UDC 621.643

INFLUENCE OF INSTALLATION COORDINATES OF PRESSURE MEASUREMENT DEVICES IN THE OIL PIPELINE ON ACCURACY IN DETERMINING LEAK PARAMETERS

Tatyana E. Mamonova,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: mamte@sibmail.com

The author proposes the method for determining leak coordinate and mass rate. The method is based on the analysis of indications of pressure gages located at the beginning and the end of a pipe, and along the pipeline. The paper describes the formulas for calculating leak coordinate and mass rate according to the offered modified method of hydraulic location. The experimental studies of the method and the rated formulas were carried out on the pipeline for pumping summer diesel fuel. The paper demonstrates the possibility of practical application of the described formulas on the offered method for determining leak parameters on the main pipelines. When analyzing the experimental results the author determined the dependences of calculation errors of leak coordinates and mass rate on location of pressure measurement devices in the pipeline.

Key words:

Oil pipeline, loss in the oil pipeline, pressure measurement device, pipeline profile, pressure trend, placing pressure sensors Singular placing Plural placings.

REFERENCES

1. Gerhard G. Principles of Leak Detection. *Fundamentals of Leak Detection*. Krohne. Oil & Gas. 2003. pp. 1–48. Available at: http://krohne.com/fileadmin/files-2/PipePatrol/KROHNE_Gerhard_Geiger_Principles_of_Leak_Detection_2012.pdf (accessed 26 December 2012).
2. Kelvin T. Erickson, E. Keith Stanek, Miller A. *Reliability of Pressure Signals in Offshore Pipeline Leak Detection*. Rolla, University of Missouri-Rolla, 2004. pp. 1–85.
3. Gorny M. Monitoring acoustic noise in steel pipelines. *Proceedings of IPC2008 7th International Pipeline Conference*. Calgary, 2008. pp. 123–135.
4. *Truboprovodniy transport nefti* [Pipeline transport of oil]. Ed. by S.M. Vaynshtoka. Moscow, Nedra-Business center Publ., 2004. Vol. 2. 621 p.
5. Mamonova T.E. Metod opredeleniya utechki iz nefteprovoda, osnovanny na raznosti vo vremeni davleniya [Method of leak definition from the oil pipeline, based on a difference in pressure time]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 216–219.
6. Lurye M.V., Makarov P.S. Gidravlicheskaya lokatsiya utechek nefteproduktov na uchastke truboprovoda [Hydraulic location of leakages of oil products on a pipeline site]. *Transport and storage of oil products*, 1998, no. 12, pp. 65–69.
7. Mamonova T.E. Obnaruzhenie utechek is nefteprovoda s ispolzovaniem ustroystva dlya izmereniya izmeneniy davleniya [Leaks detection from the oil pipeline by the device for measuring pressure changes]. *Nauka Krasnoyarsk*, 2012, no. 5 (05), pp. 102–112.
8. Kononov A.A. Istecheniya cherez malye otverstiya v tonkoy stenke pri postoyannom napore [The expiration through small openings in a thin wall at a constant pressure]. *Obrasovatelnyy resurs po gidrodinamike i gidropevmoprivodu* [Educational resource on hydrodynamics and a hydropneumatic actuator]. Available at: <http://gidravli.narod.ru/istechenie.html> (accessed 26 December 2012).

УДК 553.94:550.8:622.81(571.17)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ С УЧЁТОМ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СКВАЖИН С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ПРИРОДНОЙ ГАЗОНОСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Шубина Елена Андреевна,

аспирант кафедры транспорта и хранения нефти и газа
Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: Lena_shubina@mail.ru

Брылин Владимир Иванович,

канд. техн. наук, доцент кафедры бурения скважин
Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: brylinvi@mail.ru

Лукиянов Виктор Григорьевич,

д-р техн. наук, профессор-консультант кафедры транспорта
и хранения нефти и газа Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

Актуальность работы вызвана участвовавшими взрывами метана в угольных шахтах, что обязывает нас изменить подход к добыче угля и газа метана.

Цель работы: Увеличение природной газоносности угольных пластов и низкая эффективность проводимой предварительной дегазации на сегодняшний день являются наиболее актуальными проблемами обеспечения безопасной добычи угля. Большой объем бурения скважин, производимый при проведении различных видов дегазации, увеличивает себестоимость добычи угля и не позволяет снизить природную газоносность до необходимого уровня за короткий промежуток времени.

Методы исследования: Комплексный подход к схеме размещения геологоразведочных скважин на стадии составления проекта разведочных работ позволит использовать данные скважины для дальнейшей дегазации угольных пластов и добычи метана в промышленных масштабах.

Результаты: Применение геологоразведочных скважин в качестве дополнительных скважин для проведения заблаговременной дегазации угольных пластов позволит более эффективно снижать природную газоносность к началу ведения работ по добыче угля. Произведённый сравнительный анализ влияния густоты разведочной сети с учётом требований «Методических рекомендаций по применению классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых углей и горючих сланцев» и достигнутого на сегодняшний день радиуса воздействия на угольный пласт подтверждает необходимость возможного применения данных скважин в качестве дегазационных. Заблаговременная дегазация угольных пластов является залогом обеспечения безопасной добычи угля и метана в промышленных масштабах.

Ключевые слова:

Метан, природная газоносность, скважина, дегазация, безопасность горных работ.

В связи с развитием угледобывающей промышленности стремительными темпами наблюдается увеличение глубины ведения горных работ, а следовательно, и увеличение природной газоносности разрабатываемых угольных пластов, что существенно влияет на безопасность ведения работ, объёмы добычи угля, попутно добытого газа и загрязнение окружающей среды.

Из общего количества балансовых запасов по Кузбассу к отработке наиболее экономичным открытым способом пригодны только 20 %, а следовательно, добыча основной части балансовых запасов подлежит отработке подземным способом. Но увеличение глубины ведения работ и природной газоносности неизбежно ведёт к возрастанию себестоимости добываемой горной массы.

На сегодняшний день из-за высокой метанообильности на угольных шахтах широко применяются текущая и предварительная дегазация угольных пластов. При проведении дегазации одного

выемочного участка производится бурение от 10 до 150 тысяч метров, а также согласно инструкции по дегазации угольных пластов производится вынужденный простой оконтуренного выемочного участка в связи с его дегазацией.

Высокая природная газоносность создаёт настолько повышенное метановыделение, что её снижение возможно только с применением комплексной дегазации угольных пластов, т. е. применяется сочетание различных способов или схем дегазации одного или нескольких источников газосодержания.

К методам дегазации, позволяющим снижать природную газоносность до начала ведения очистных работ, относятся: барьерная и предварительная дегазация. Также к данным методам относится недостаточно применяемая в России заблаговременная дегазация.

В связи с низким коэффициентом эффективности предварительной дегазации (0,2...1,4 %) основная часть выделяющегося метана при разруше-

нии пласта выбрасывается на поверхность посредством текущей дегазации, а именно с помощью вентиляции горных выработок (10...40 %) и газоотсасывающих вентиляторов (60...90 %), установленных во фланговой части выемочного участка.

Следовательно, проводимые мероприятия по дегазации пластов не только не позволяют наращивать темпы безопасной добычи угля, но и несут предприятию очень большие затраты.

Трудности добычи метана из угольных пластов связаны с их низкой проницаемостью при нахождении метана в сорбированном состоянии. Для повышения проницаемости пластов на сегодняшний день разработаны различные методы воздействия на угольный пласт.

Заблаговременная дегазация пластов угля производится вертикальными, наклонными и горизонтальными скважинами с земной поверхности, преимущественно с предварительным гидрорасчленением пластов или использованием других методов воздействия на угольный пласт с целью формирования системы трещин для дальнейшего извлечения метана из угленосного массива до начала подготовительных или очистных работ.

Применяемые методы воздействия позволяют дегазировать участок недр вокруг вертикальной скважины радиусом 200...300 м в зависимости от геологических условий и выбранного метода воздействия на пласт.

Параметры способа гидрорасчленения пластов, установленные по результатам промышленного внедрения данного способа на шахтах Карагандинского и Донецкого бассейнов, уточняются институтами-разработчиками способа гидрорасчленения пласта.

Перспективными участками для производства заблаговременной дегазации на основе гидрорасчленения пласта являются участки с природной газоносностью более 8 м³/т сухой беззолной массы (с.б.м.) и при их залегании в водонепроницаемых породах не ниже средней устойчивости [1–5].

Эффективность работы скважин зависит от многих факторов, в связи с чем сроки извлечения метана из угольного пласта составляют более 3 лет.

Выполненными ВНИМИ исследованиями установлено, что, при ведении горных работ на больших глубинах в сложных горно-геологических условиях в качестве одного из наиболее эффективных мероприятий по предупреждению горных ударов могут применяться технологии, используемые в нефтяной и газовой промышленности и позволяющие воздействовать на массив горных пород на больших площадях.

В качестве одного из технических решений, позволяющих управлять напряженно-деформированным состоянием массива горных пород на больших площадях, предлагается апробированная на угольных и нефтегазоконденсатных месторождениях России волновая акустическая геотехнология интенсификации дебита эксплуатационных скважин (ВАГИДЭС). Технология ВАГИДЭС по-

зволяет управлять состоянием массива как через скважины, пробуренные с поверхности, так и из подземных горных выработок угольных или рудных шахт. Локальным вариантом этой технологии является технология ЛАВОПОР (локальное акустическое возбуждение горных пород).

С помощью волнового акустического воздействия можно добиться изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород, поскольку система «скважина–пласт», «скважина – горная порода» является резонансной.

Технологии ВАГИДЭС и ЛАВОПОР являются уникальными и позволяют заблаговременно провести дегазацию массива или его разгрузку от повышенных напряжений, т. е. привести в безопасное состояние массив горных пород на значительных площадях – до 200 тыс. м² (R~500 м) через скважины с поверхности; а через скважины пробуренные из подземных горных выработок до 30 тыс. м² (R~200 м).

Принцип работы заключается в следующем: возбуждая в пласте на заданном удалении от скважины упругие волны напряжений, амплитуда которых превышает предельные напряжения сжатия или предельные напряжения упругости, или ведя акустическое возбуждение литологического разреза в пределах упругих напряжений, в результате можно получить пространственные зоны различных его состояний или регулировать механические свойства горной породы по необходимости [6].

Современные технологии заблаговременной дегазации скважинами с поверхности позволяют извлекать 70...90 % общего содержания метана. Имеются случаи извлечения метана со средней природной газоносностью 3...4 м³/т (с.б.м.) [7].

Мировой опыт безопасного ведения горных работ сформировал термин метаноправляемость, который подразумевает извлечение 75 % от общего объема метана посредством заблаговременной дегазации, 15 % за счёт предварительной дегазации и 10 % за счёт проветривания выработок, т. е. текущей дегазации.

Но, к сожалению, внедрение производства заблаговременной дегазации в сложившейся сложной ситуации идёт очень низкими темпами, можно сказать на уровне разговоров. Это связано в первую очередь с высокой стоимостью бурения сети скважин и сроками проведения буровых и дегазационных работ, которые составляют от трех лет и более.

Количество скважин, их глубина и расположение зависят от многих факторов и рассматриваются индивидуально по каждому участку, так же как и направление бурения.

Бурение вертикальных скважин обычно менее дорогостоящее, чем горизонтальных. В большинстве случаев для бурения вертикальных скважин не требуется никаких дополнительных мер или услуг. Также при производстве заблаговременной дегазации бурят наклонно-направленные скважины, т. е. преднамеренно отклоняя ствол скважины от вертикали, и горизонтальные скважины, которые

преимущественно применяют при большой мощности угольных пластов или при бурении в труднодоступных местах, где обеспечение доступа к каждой отдельной скважине обходится слишком дорого. Одна горизонтальная скважина может заменить несколько вертикальных, но и затраты на ее бурение значительно выше. Кроме того, требуется специальное оборудование и подготовленный персонал. Плотность размещения скважин определяется в основном фактором времени, т. е. чем более сжаты сроки освоения пластов, тем большее количество скважин требуется [7].

В некоторых случаях используют комбинированную схему размещения скважин, т. е. индивидуальные вертикальные, горизонтальные и наклонные скважины. Все эти типы скважин имеют свои достоинства и недостатки, но так как при производстве разведочных работ преимущественно бурятся вертикальные скважины и лишь в некоторых случаях наклонно-направленные, далее пойдет речь именно о них.

Для решения проблемы высокой природной газонасыщенности к моменту начала ведения горных работ по пласту предлагается внедрение заблаговременной дегазации участка с применением геологоразведочных скважин, намеченных к бурению при производстве разведочных работ по проектируемому участку.

Производимый объем исследований природной газонасыщенности на различных стадиях геологоразведочных работ позволяет по результатам поисково-оценочной стадии геологоразведочных работ иметь достаточное представление о природной газонасыщенности участка для принятия решения о необходимости дальнейшего изучения и проведения заблаговременной дегазации.

Имеющийся опыт по уже разведанным смежным участкам в Кузнецком бассейне дает общее представление о мощности зоны газового выветривания и дальнейшем увеличении природной газонасыщенности угольной толщи с глубиной.

В среднем по действующим угольным предприятиям Кузбасса мощность зоны газового выветривания угольных пластов изменяется от 200 до 100 м, что соответствует горизонтам от +200 до ± 0 м абс. Развитие горных работ на сегодняшний день преимущественно осуществляется на горизонте ± 0 м абс. и ниже.

Природная газонасыщенность по горизонтам имеет следующие значения, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Общие сведения о природной газонасыщенности Кузбасса

Горизонт, м абс.	Метанонасыщенность, м ³ /т с.б.м.	Глубина ведения горных работ, м
+ 200	0...9	100...200 (зона метановыветривания)
+100	10...15	200...300
± 0	13...22	300...400
-300	22...30	600...900

Из табл. 1 следует, что природная газонасыщенность угольных пластов действующих предприятий преимущественно составляет 10...30 м³/т с.б.м. и с увеличением глубины разработки будет только возрастать, что приведёт к серьёзным производственным затратам на снижение газонасыщенности. Более наглядно увеличение природной газонасыщенности с глубиной залегания представлено на рис. 1.

Использование разведочных скважин для проведения заблаговременной дегазации участка в первую очередь позволит рационально использовать время, необходимое на проектирование горных работ, проведение экспертизы проекта отработки участка и начальной стадии строительства предприятия, на выполнение работ по снижению природной газонасыщенности к моменту начала проведения вскрывающих и подготовительных выработок.

Правительство РФ постановлением № 315 от 25.04.2011 г. установило обязательное проведение дегазации угольных пластов при превышении природной газонасыщенности 13 м³/т с.б.м.

В странах с более развитой угольной промышленностью в целях обеспечения безопасных условий труда данный порог уже снижен до 9 м³/т с.б.м.

В связи с многочисленными взрывами на угольных шахтах данный вопрос о снижении порога до 9 м³/т уже рассматривается и в РФ, но пока всё остается без изменений. Следовательно, в будущем при отработке участков с природной газонасыщенностью 13...30 м³/т с.б.м. заблаговременная дегазация неизбежно перейдет в разряд необходимых мероприятий.

Кроме того, в зависимости от величины относительной метанообильности производится установление категории шахты по метану. Таким образом, согласно п. 267 «ПБ в угольных шахтах», при относительной метанообильности 15 м³/т с.б.м. и более шахту относят к категории «сверхкатегорной» [8].

Проведенный анализ относительной метанообильности угольных шахт Кузбасса, работающих ниже гор. ± 0 м абс. показывает, что большинство шахт относятся к «сверхкатегорным», так как относительная метанообильность составляет 30...60 м³/т с.б.м. и более.

Учитывая вышеизложенное, подчёркивается актуальность проблемы высокой природной газонасыщенности, так как относительная метанообильность в 2–4 раза превышает установленный критерий отнесения шахт к «сверхкатегорному» виду. Поэтому вопрос о целесообразности многофункционального использования геологоразведочных скважин с целью проведения заблаговременной дегазации предлагается рассматривать при составлении проекта разведки участка, анализируя сведения о природной газонасыщенности участка по данным поисково-оценочной стадии геологоразведочных работ.

Применяя разведочную сеть в соответствии с «Методическими рекомендациями...» [9] помимо решения задач, поставленных геологическим заданием в соответствии со стадией геологоразведоч-

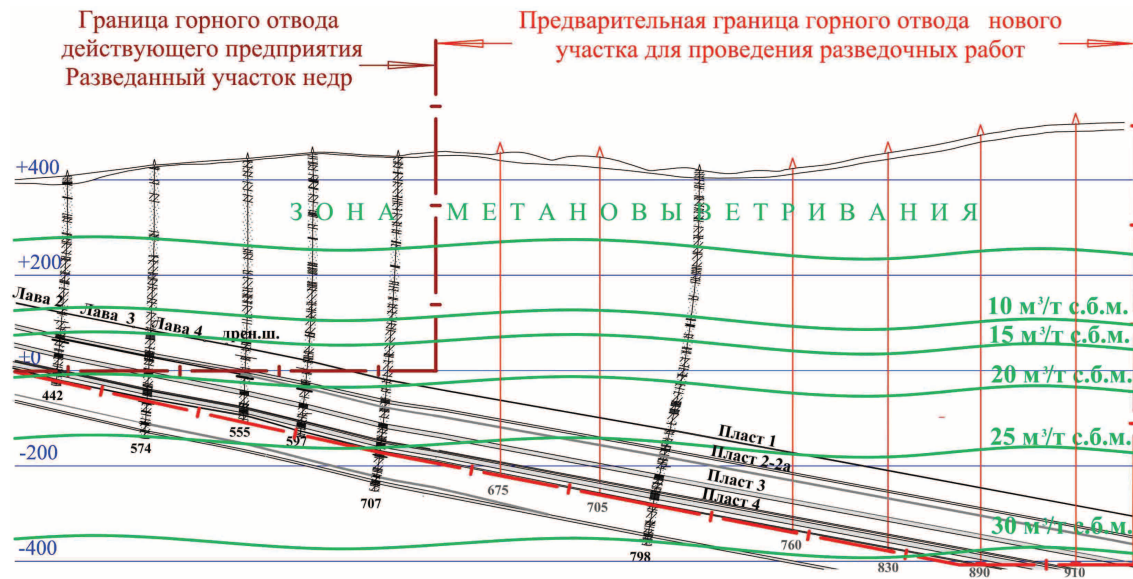


Рис. 1. Геолого-газовый разрез угольной толщи

ных работ, можно предусмотреть возможность проведения в дальнейшем и заблаговременной дегазации проектируемого участка с использованием планируемых скважин. Данные скважины необходимо временно консервировать на период составления геологического отчета, выделения запасов метана и их утверждения.

В табл. 2 представлен анализ покрываемой площади дегазируемого участка при зонах влияния воздействия на пласт 200 и 300 м. Размещение проектируемых геологоразведочных скважин выполнено в соответствии с вышеуказанными рекомендациями.

Например, учитывая требования заложения геологоразведочных скважин для относительно выдержанных пластов: 200 м между скважинами, до 400 м между разведочными линиями, создаваемая сеть при радиусе гидрорасчленения 200 м, позволит дегазировать до 100 % площади участка (рис. 2) и снизить природную газоносность до 13 м³/т с.б.м. и более.

Представленная сеть скважин также может использоваться при отработке участка для дегазации выработанного пространства, что предотвратит внезапное загазирование горных выработок при посадке основной кровли.

Следовательно, сгущение разведочной сети на стадии разработки проекта разведки участка в свою очередь позволит произвести подсчет запасов по более высоким категориям и в дальнейшем обеспечить дегазацию 100 % площади проектируемого участка, снизит природную газоносность на 70...90 % [7], обеспечит безопасное ведение горных работ без применения предварительной дегазации, снизит нагрузку, возлагаемую на текущую дегазацию.

Предусмотрев на этапе составления проекта разведочных работ оптимальную конструкцию, количество геологоразведочных скважин и возможность их дальнейшего использования для производства заблаговременной дегазации, появляется возможность рационально использовать период

Таблица 2. Сравнительный анализ влияния густоты разведочной сети на количество покрываемой площади для производства заблаговременной дегазации участка

Выдержанность пластов	Покрываемая площадь дегазируемого участка	Расстояния между скважинами по категориям запасов, м					
		А		В		С ₁	
		между линиями	между скважинами на линиях	между линиями	между скважинами на линиях	между линиями	между скважинами на линиях
		600...800	200...400	800...1200	400...600	до 2000	до 1000
Выдержанные	При радиусе влияния воздействия на пласт 200 м	45...78 %		20...45 %		13...28 %	
	При радиусе влияния воздействия на пласт 300 м	72...100 %		35...75 %			
Относительно выдержанные	При радиусе влияния воздействия на пласт 200 м	300...400	150...250	400...600	200...300	до 1000	до 500
		100 %		75...100 %		25...55 %	
		100 %		100 %			

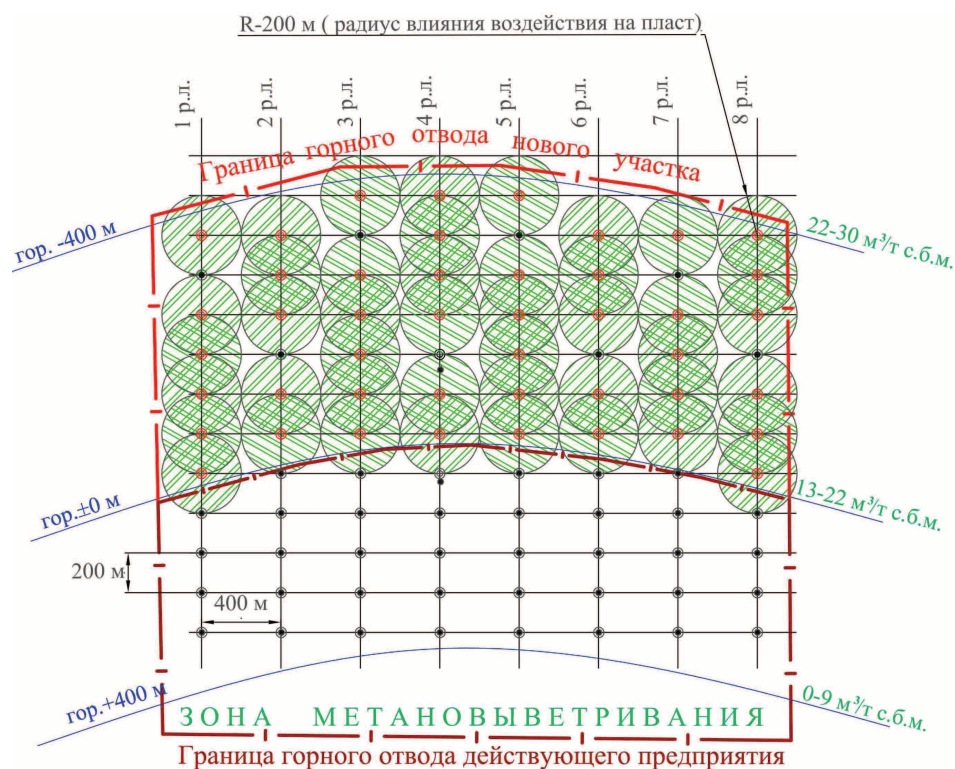


Рис. 2. Схема размещения скважин

времени проектирования участка на снижение природной газонасыщенности к началу ведения горных работ. При этом возможно более оперативно дегазировать шахтное поле в период строительства угледобывающего предприятия, производя заблаговременную дегазацию по шахтным блокам или участкам.

Концентрация добываемого метана посредством заблаговременной дегазации позволяет использовать добытый газ во многих отраслях промышленности. В странах с развитой добычей метана добытый газ в основном используется на нужды данного предприятия: для заправки автомобилей, в качестве топлива для котельных, выработки электроэнергии и т. д.

Выводы

Рассматривая применение разведочных скважин в качестве дегазационных, появляется возможность параллельно решить ряд производственных вопросов:

- снижаются затраты на бурение непродуктивных отложений и зоны метановыветривания (100...200 м). Объёмы бурения по непродуктивным отложениям или зоны метановыветривания на некоторых участках могут достигать 50...70 % от общего объёма бурения, проводимого при геологоразведочных работах;
- производится дегазация пластов-спутников и отщепившихся пластов, которые при отработке выемочного участка попадают в зону разгрузки и увеличивают объём метана в выработанном пространстве;
- сокращаются затраты на обсадные трубы, так как по опыту их извлечения до 40 % труб деформируется;
- появляется возможность использовать скважины в качестве дегазации купола обрушения;
- исключаются простои высокопроизводительного оборудования по газовому фактору при отработке участка;
- снижается образование фотохимического смога и «парникового» эффекта, которые возросли за последние десятилетия примерно в 8 раз за счёт выбросов метана в атмосферу из шахт Кузбасса;
- повышается рентабельность угледобычи за счёт выработки собственной электроэнергии, организации автозаправок, применения добытого метана в котельных и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пучков Л.А., Слостунов С.В., Федунец Б.И. Перспективы добычи метана в Печорском угольном бассейне. – М.: Изд-во МГТУ, 2004. – 557 с.
2. Пучков Л.А., Слостунов С.В., Презент Г.М. Перспективы промышленного извлечения угольного метана // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 6. – С. 6–10.
3. Пучков Л.А., Слостунов С.В., Коликов К.С. Проблемы реализации концепции метанобезопасности на угольных шахтах России // Уголь. – 2009. – № 1. – С. 28–30.
4. Малышев Ю.Н., Худин Ю.Л., Васильчук М.П. и др. Проблемы разработки метаноносных пластов в Кузнецком угольном бассейне. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. – 463 с.
5. Слостунов С.В. Заблаговременная дегазация и добыча метана из угольных месторождений. – М.: Изд-во МГТУ, 1996. – 441 с.
6. Верниго В.М., Кульчицкий В.Б. Предупреждение горных ударов и внезапных выбросов в горнодобывающей промышленности // Горная Промышленность. – 2006. – № 4. – С. 6–7.
7. Сикора П., Смыслов Д. и др. Особенности заблаговременной дегазации угольных пластов методом бурения скважин с поверхности // Глюкауф. – 2008. – № 1. – С. 38–45.
8. Правила безопасности в угольных шахтах (ПБ 05–618–03). Серия 05 выпуск 11. – М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. – 296 с.
9. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Угли и горючие сланцы. – М.: Изд-во ФГУ ГКЗ, 2007. – 84 с.

Поступила 25.09.2013 г.

UDC 553.94:550.8:622.81(571.17)

DESIGN OF GEOLOGICAL EXPLORATION CONSIDERING MULTIFUNCTIONAL USE OF WELLS TO REDUCE NATURAL GAS CONTENT OF COAL BEDS

Elena A. Shubina,

Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: Lena_shubina@mail.ru.

Vladimir I. Brylin,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: brylinvi@mail.ru.

Viktor G. Lukyanov,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30.

Relevance of the study is important because of often methane explosions in coal mines. It obliges us to change the approach to extraction of coal and methane gas.

The main aim of the study: The increased natural gas-bearing of coal beds and low effectiveness of the preliminary degassing today are the most urgent problems to ensure safe coal production. The large volume of drilling at various types of degassing increases coal mining cost and does not permit to reduce the natural gas-bearing to the desired level in a short period of time.

The methods used in the study: The integrated approach to allocation scheme of exploration holes at the stage of exploration project will allow using these holes for further degassing of coal beds and methane production on industrial scale.

The results: Application of exploration holes as additional holes for degassing coal beds in advance will allow more effective reduction of natural gas-bearing to the start of coal mining. The comparative analysis of exploration network density influence with the requirements of the «Guidelines on the application of classification and probable reserves of the deposits of solid minerals, resources of coal and oil shale» and coal bed radius of stimulation achieved for the moment confirms the need for the possible use of these holes as the degassing ones. The advance degassing of coal beds is crucial to ensure coal and methane safe production on industrial scale.

Key words:

Methane, natural gas-bearing, hole, degassing, safety of mining operations.

REFERENCES

1. Puchkov L.A., Slustunov S.V., Fedunets B.I. *Perspektivy dobychi metana v Pechorskom ugolnom bassejne* [Prospects of methane production in the Pechora coal basin]. Moscow, MGTU Publ., 2004. 557 p.
2. Puchkov L.A., Slustunov S.V., Preznet G.M. *Perspektivy promyshlennogo izvlecheniya ugolnogo metana* [Prospects of industrial extraction of coal methane]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2002, no. 6, pp. 6–10.
3. Puchkov L.A., Slustunov S.V., Kolikov K.S. Problemy realizatsii kontseptsii metanobezopasnosti na ugolnykh shakhtakh Rossii [Problems of implementation of methane-safety concept on coal mines of Russia]. *Ugol*, 2009, no. 1, pp. 5–9.
4. Malyshev Yu.N., Khudin Yu.L., Vasilchuk M.P. *Problemy razrabotki metanonosnykh plastov v Kuznetskom ugolnom bassejne* [Problems of developing methane-bearing layers in Kuznetsk coal basin]. Moscow, Akademiya gornykh nauk, 1997. 463 p.
5. Slustunov S.V. *Zablagovremennaya degazatsiya i dobycha metana iz ugolnykh mestorozhdeniy* [Preliminary decontamination

- and methane production from coal fields]. Moscow, MGGU Publ., 1996. 441 p.
6. Vernigo V.M., Kulchitskiy V.B. Preduprezhdenie gornyykh udarov i vnezapnykh vybrosov v gornodobyvayushshey promyshlennosti [Prevention of mountain blows and sudden emissions in the mining industry]. *Gornaya Promyshlennost*, 2006, no. 4, pp. 6–7.
 7. Sikora P., Smyslov D. Osobennosti zablagovremennoy degazatsii ugolnykh plastov metodom bureniya skvazhin s poverkhnosti [Features of preliminary decontamination of coal layers by the method of well surface drilling]. *Glyukauf*, 2008, no. 1, pp. 38–45.
 8. *Pravila bezopasnosti v ugolnykh shakhtakh (PB 05–618–03)* [Safety rules for coal mines]. Moscow, Gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatie «Nauchno-tekhnicheskiy tsentr po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii». Ser. 05, Iss. 11, 2003. 296 p.
 9. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdeniy i prognoznnykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Ugli i goryuchie slantsy* [Methodical recommendations on application of Classification of stocks of fields and expected resources of firm minerals. Coals and combustible slates]. Moscow, FGU GKZ Publ., 2007. 34 p.

УДК 541.64:622.245.422

ПОРИСТОСТЬ И ПРОНИЦАЕМОСТЬ ОБЛЕГЧЁННЫХ ТАМПОНАЖНЫХ РАСТВОРОВ

Пахарев Александр Владимирович,

ассистент кафедры бурения Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: avpaharev@tpu.ru, gtn_tomsk@mail.ru

Приводятся свойства тампонажных растворов с полыми стеклянными микросферами для условий скважин Томской области. Рассмотрены пористость и проницаемость тампонажного камня. Пористость тампонажного камня определялась на основе метода А.Г. Перехоженцева. Была определена пористость цементной матрицы. Также была определена общая пористость тампонажного камня. По классификации Г.И. Горчакова была количественно оценена гелевая, капиллярная, воздушная пористость цементной матрицы и облегчённого тампонажного камня в зависимости от расхода полых стеклянных микросфер. После обработки полученных изотерм сорбции для образцов тампонажного камня были построены графики. Анализ этих графиков позволяет заключить, что при твердении тампонажного камня при давлениях формируется более плотная структура камня, также введение в состав облегчённого тампонажного раствора полых стеклянных микросфер снижает паропроницаемость камня.

Ключевые слова:

Облегчённые тампонажные растворы, полые стеклянные микросферы, свойства тампонажных растворов, пористость, проницаемость камня.

В статье [1] авторами был проведён подробный анализ геологических условий нефтяных и нефтегазоконденсатных месторождений Томской области. Авторы [2, 3] считают, что разработанный облегчённый тампонажный раствор с полыми стеклянными микросферами (ПСМС) для крепления скважин является одним из лучших способов обеспечения их надёжной эксплуатации. Тем более что такими растворами зацементировано более 100 скважин на месторождениях Севера Тюменской области, Нижней Волги и шельфа Каспийского моря.

Для комплексного изучения свойств тампонажного раствора с полыми стеклянными микросферами необходимо исследование пористости и проницаемости цементного камня. Минимальные значения этих характеристик после ожидания затвердевания цементного раствора (ОЗЦ) будут обеспечивать герметичность конструкции скважины, требуемые прочностные показатели. Свойства облегчённого тампонажного раствора с полыми стеклянными микросферами представлены в табл. 1.

Пористость тампонажного камня определялась на основе метода А.Г. Перехоженцева по сорбции водяного пара в порах цементных материалов раз-

ных диаметров [4]. Размер молекулы воды был принят $3,5 \cdot 10^{-10}$ м.

Таблица 1. Свойства облегченного тампонажного камня.
Условия твердения: температура $(75 \pm 2)^\circ\text{C}$, давление – атмосферное

Состав раствора, мас. %	Средняя плотность, г/см ³	Пористость матрицы, %	Прочность, МПа	
			изгиб	сжатие
100 ПЦТ; 50 В	1,815	15,1	5,6	17
100 ПЦТ1; 2,5 ПСМС2; 58 В	1,61	14,2	4,8	12,5
100 ПЦТ; 5 ПСМС; 62,5 В	1,425	18,2	3,5	7,5
100 ПЦТ; 7,5 ПСМС; 70 В	1,34	20	2,45	6
100 ПЦТ; 2,5 АПСМС3; 54 В	1,624	12,3	5,4	13,9
100 ПЦТ; 5 АПСМС; 59 В	1,48	13,8	4,5	8,7
100 ПЦТ; 7,5 АПСМС; 66 В	1,41	18,5	3,6	7,5

Примечание: 1 – полые стеклянные микросферы; 2 – портландцемент тампонажный; 3 – аппретированные полые стеклянные микросферы.

Была определена пористость цементной матрицы, которая располагается между водо- и газонепроницаемыми полыми стеклянными микросферами. Результаты представлены в табл. 1, 2. Анализ этих результатов показал, что при использова-

нии ПСМС (при расходе микросфер 2,5 %) и АПСМС (при расходе микросфер 2,5 и 5 % от массы ПЦТ) тампонажный камень имеет среднюю плотность на 12...22 % ниже, а также меньшую пористость цементной матрицы, чем цементный камень состава 1 (100 % ПЦТ).

Таблица 2. Пористость цементной матрицы и облегченного тампонажного камня

Пористость	Пористость, % объема камня, при расходе микросфер					
	2,5 ПСМС	5 ПСМС	7,5 ПСМС	2,5 АПСМС	5 АПСМС	7,5 АПСМС
Матрицы	14,2	18,2	20	12,3	15,8	18,5
Микросфер	7,3	12,5	18,8	7,2	12,3	18,3
Общая пористость камня	21,5	30,7	38,8	19,5	28,1	36,8

Также была определена общая пористость тампонажного камня с учетом внутреннего объема полых стеклянных микросфер (табл. 2). Она повышается по мере роста расхода ПСМС. Самая низкая общая пористость наблюдалась у состава с 2,5 % аппретированных микросфер. Она составляет 19,5 % при пористости матрицы, равной 12,3 %. Самая большая общая пористость у состава с 7,5 % ПСМС. Она равна 38,8 % при пористости матрицы 20 %. Определено, что самую низкую общую пористость имеет состав с 2,5 % АПСМС, а самую высокую – с 7,5 % ПСМС. Причем пористость матрицы составляет от двух третей до половины общей пористости у тампонажных камней с 2,5 и 7,5 % полых стеклянных микросфер соответственно.

Таблица 3. Пористость тампонажного камня, твердевшего при давлении 10 и 30 МПа

Поры	% от общей пористости матрицы при расходе микросфер					
	2,5 ПСМС	5 ПСМС	7,5 ПСМС	2,5 АПСМС	5 АПСМС	7,5 АПСМС
Атмосферное давление 0,1 МПа						
Гелевые	94,1	90,5	85,2	95,3	92,1	87,4
Капиллярные	5,2	8	12,3	4,1	6,7	10,8
Воздушные	0,7	1,5	2,1	0,6	1,2	1,8
Давление 10 МПа						
Гелевые	96,3	93,4	88,3	97,4	94,1	89,5
Капиллярные	3,4	5,9	10,6	2,4	5,3	9,6
Воздушные	0,3	0,7	1,1	0,2	0,6	0,9
Давление 30 МПа						
Гелевые	97,3	94,5	89,4	98,3	95,5	90,5
Капиллярные	2,5	3,9	9,6	1,6	4,1	8,8
Воздушные	0,2	0,6	1	0,1	0,4	0,7

По классификации Г.И. Горчакова [5] пористость цементных материалов делится на гелевую (диаметр пор менее $1 \cdot 10^{-7}$ м), капиллярную (диаметр пор от $1 \cdot 10^{-7}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ м) и воздушную (диаметр пор более $5 \cdot 10^{-5}$ м). Капиллярные и воздушные поры наиболее проницаемы для различных

флюидов. На основании приведенной классификации была количественно оценена гелевая, капиллярная, воздушная пористость цементной матрицы и облегченного тампонажного камня в зависимости от расхода полых стеклянных микросфер (табл. 3).

Самая высокая гелевая пористость, самые низкие капиллярная и воздушная пористость определены у камня с содержанием 2,5 % АПСМС. С увеличением расхода микросфер гелевая пористость снижается, а капиллярная и воздушная возрастают. Причем гелевая пористость максимальна при расходе АПСМС 2,5 % от массы ПЦТ и равна 95,3 % от пористости цементной матрицы. Установлено, что самая низкая гелевая пористость при расходе обычных микросфер 7,5 %. Это связано с более высоким количеством воды затворения.

После обработки полученных изотерм сорбции для образцов тампонажного камня на основе 100 % ПЦТ, а также с полыми стеклянными неаппретированными – ПСМС, и аппретированными – АПСМС, микросферами были построены графики. Результаты представлены на рис. 1–3 и в табл. 1, 2. Эксперименты проводились в эксикаторах в течение 4 месяцев до прекращения прироста массы образцов. В эксикаторах поддерживалась требуемая относительная влажность: сначала низкая, затем она постепенно увеличивалась до 98 %. Образцы постоянно взвешивались.

Таблица 4. Паропроницаемость тампонажного камня с ПСМС, полученного при давлении: атмосферном и 30 МПа и температуре (75 ± 2) °С

Состав раствора, мас. %	Средняя плотность камня, г/см ³		Пористость матрицы, %	Паропроницаемость, мг/м ² Па	Сопротивление паропроницанию, м ² ·Па/мг
	в 2 сут.	сухого			
Тампонажный камень сформирован при атмосферном давлении					
100 ПЦТ	1,815	1,612	15,1	1,96·10 ⁻²	0,51
100 ПЦТ; 2,5 ПСМС	1,61	1,42	14,2	1,2·10 ⁻²	0,812
100 ПЦТ; 5 ПСМС	1,425	1,216	18,2	0,96·10 ⁻²	1,04
100 ПЦТ; 7,5 ПСМС	1,34	1,137	20	1,12·10 ⁻²	0,914
100 ПЦТ; 2,5 АПСМС	1,624	1,438	12,3	1·10 ⁻²	1,01
100 ПЦТ; 5 АПСМС	1,48	1,28	13,8	0,9 ·10 ⁻²	1,105
100 ПЦТ; 7,5 АПСМС	1,41	1,205	18,5	1,1·10 ⁻²	0,94
Тампонажный камень сформирован при давлении 30 МПа					
100 ПЦТ	2,01	1,81	6,1	0,87·10 ⁻²	1,1
100 ПЦТ; 2,5 ПСМС	1,65	1,4	5,8	0,56·10 ⁻²	1,75
100 ПЦТ; 5 ПСМС	1,49	1,22	6,7	0,42·10 ⁻²	2,27
100 ПЦТ; 7,5 ПСМС	1,45	1,2	7,3	0,51·10 ⁻²	1,94
100 ПЦТ; 2,5 АПСМС	1,65	1,45	5,2	0,46·10 ⁻²	2,2
100 ПЦТ; 5 АПСМС	1,55	1,26	5,9	0,39·10 ⁻²	2,38

Анализ рис. 1–3 позволяет заключить, что при твердении тампонажного камня при давлениях от 0,1 до 30 МПа формируется более плотная структура камня. При этом пористость цементной матрицы уменьшается более чем в 2 раза.

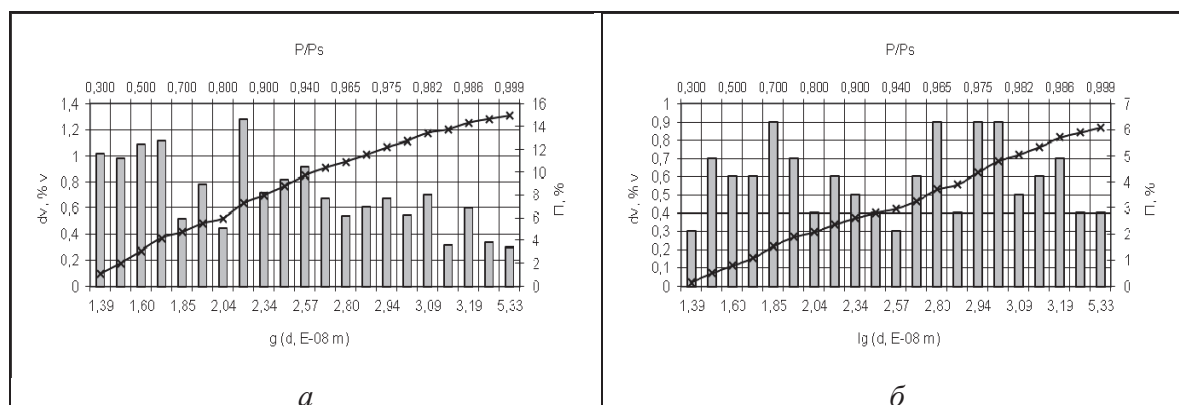


Рис. 1. Гистограмма дифференциального распределения и интегральная кривая распределения пор по диаметрам тампонажного камня состава 100 % ПЦТ в зависимости от относительной влажности: а) при атмосферном давлении; б) при давлении 30 МПа

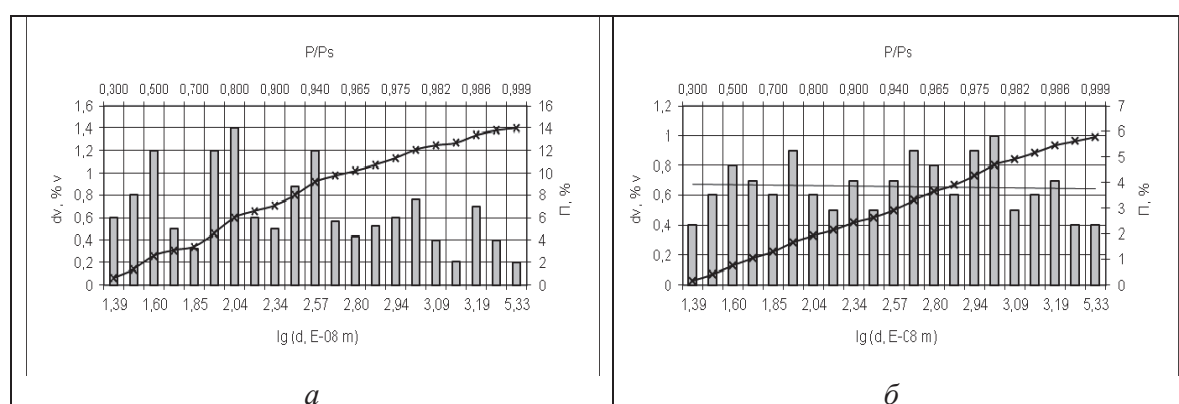


Рис. 2. Гистограмма дифференциального распределения и интегральная кривая распределения пор по диаметрам тампонажного камня состава 100 ПЦТ; 2,5 ПСМС в зависимости от относительной влажности: а) при атмосферном давлении; б) при давлении 30 МПа

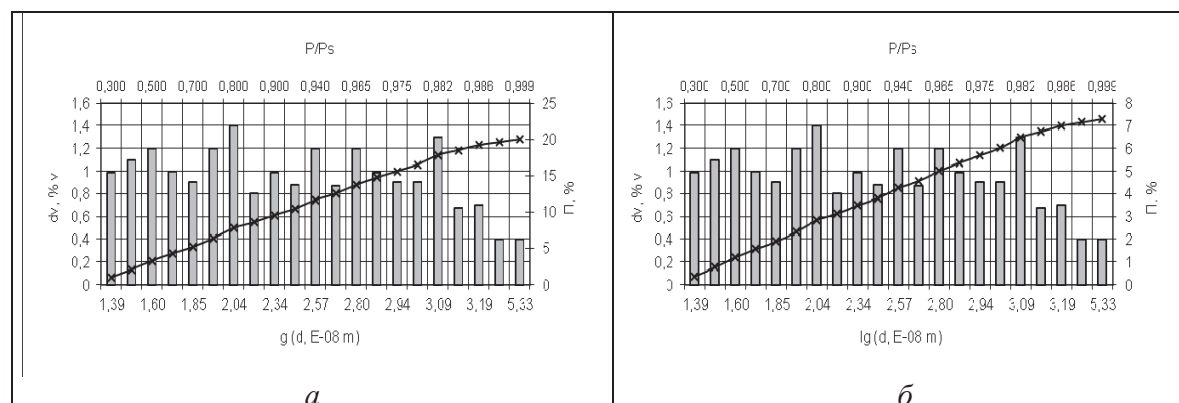


Рис. 3. Гистограмма дифференциального распределения и интегральная кривая распределения пор по диаметрам тампонажного камня состава 100 ПЦТ; 7,5 ПСМС в зависимости от относительной влажности: а) при атмосферном давлении; б) при давлении 30 МПа

Для подтверждения факта уплотнения структуры были определены паропроницаемость и сопротивление паропроницаанию облегченных тампонажных растворов с ПСМС или АПСМС с расходом микросфер от 2,5 до 7,5 % от массы ПЦТ в НИИ строительной физики по «ГОСТ 25898–83. Методы определения сопротивления паропроницаанию». Паропроницаемость определялась у высу-

шенного образца. Результаты представлены в табл. 4. Было установлено, что по показателям паропроницаемости тампонажный раствор в этом диапазоне расхода микросфер соответствует рубероиду. При расходе микросфер 5 % от массы ПЦТ паропроницаемость уменьшается более чем в 2 раза. Для всех других составов она значительно ниже, чем у камня из чистого ПЦТ. Это снижение было

более полутора раз. Рост сопротивления паропрооницанию при этом был в таких же пределах.

Введение в состав облегченного тампонажного раствора полых стеклянных микросфер от 2,5 до 7,5 % от массы ПЦТ снижает паропроницаемость камня, а значит, повышает герметичность скважины и системы «обсадная труба – цементное кольцо – горная порода» за счёт газо- и водонепроницаемых полых стеклянных микросфер и максимально плотности структуры облегченного тампонажного камня.

Для формирования образцов при повышенных давлениях использовался консистометр НТНР

ОФТЕ модели 120 (США). Формовались кубы с ребром 50 мм и применялась счетверенная форма для призм 20?20?100 мм.

Таким образом, количественно определены пористость цементной матрицы, общая, гелевая, капиллярная, воздушная пористости тампонажного камня с полыми стеклянными микросферами, а также его паропроницаемость и сопротивление паропрооницанию. Установлено, что при повышении давления от 0,1 до 30 МПа, при котором происходит твердение облегченного тампонажного камня, пористость и проницаемость камня уменьшается более чем в 1,5–2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы качества крепления скважин в Томской области / П.С. Чубик, А.В. Пахареv, Д.В. Орешкин, К.В. Беляев // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2011. – № 7. – С. 35–37.
2. Пахареv А.В., Беляев К.В. Свойства тампонажного камня, сформированного в условиях скважины Томской области // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2012. – № 6. – С. 42–44.
3. Орешкин Д.В., Беляев К.В., Пахареv А.В. Разработка универсального тампонажного раствора для геологических условий Томской области // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2011. – № 10. – С. 42–44.
4. Перехоженцев А.Г. Вопросы теории и расчёта влажностного состояния неоднородных участков ограждающих конструкций зданий. – Волгоград: ВолгГАСА, 1997. – 273 с.
5. Горчаков Г.И. и др. Состав, структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1976. – 145 с.

Поступила 30.08.2013 г.

UDC 541.64:622.245.422

POROSITY AND PERMEABILITY OF LIGHTWEIGHT CEMENT MORTARS

Aleksandr V. Pakharev,

Tomsk Polytechnic University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: avpakharev@tpu.ru

The paper introduces the properties of cement mortars with hollow glass microspheres for wells of Tomsk region. The author has considered porosity and permeability of cement stone. Porosity of cement stone was determined based on the method of A.G. Perekhozhentsev. The cement matrix porosity as well as porosity of cement stone were defined. Based on G.I. Gorchakov classification the author estimated gel, capillary and air porosity of cement matrix and light-weight cement stone depending on consumption of hollow glass microspheres. The author constructed a diagram for the cement stone samples after the obtained sorption isotherms have been processed. The analysis of these diagrams allows making the conclusion that stone compact structure is formed at cement stone hardening at pressures; introduction of hollow glass microspheres into the structure of cement mortars decreases stone vapor permeability.

Key words:

Light-weight cement mortars, hollow glass microspheres, properties of cement mortars, porosity and permeability of stone.

REFERENCES

1. Chubik P.S., Pakharev A.V., Orshkin D.V., Belyaev K.V. Problemy kachestva krepeleniya skvazhin v Tomskoy oblasti [Problems of quality of fastening of wells in Tomsk the region]. *Stroitelstvo neflyanykh i gazovykh skvazhin na sushi i v more*, 2011, no. 7, pp. 35–37.
2. Pakharev A.V., Belyaev K.V. Svoystva tamponazhnogo kamnya, sformirovannogo v usloviyakh skvazhin Tomskoy oblasti [Properties of the plugging stone formed under conditions of a well in Tomsk region]. *Stroitelstvo neflyanykh i gazovykh skvazhin na sushi i v more*, 2012, no. 6, pp. 42–44.
3. Orshkin D.V., Belyaev K.V., Pakharev A.V. Razrabotka universal'nogo tamponazhnogo rastvora dlya geologicheskikh usloviy Tomskoy oblasti [Development of universal plugging solution for geological conditions of Tomsk region]. *Stroitelstvo neflyanykh i gazovykh skvazhin na sushi i v more*, 2011, no. 10, pp. 42–44.
4. Perekhozhentsev A.G. *Voprosy teorii i rascheta vlazhnostnogo sostoyaniya neodnorodnykh uchastkov ograzhdayushchikh konstruksiy* [Questions of the theory and calculation of a moist condition of non-uniform sites of protecting designs of buildings]. Volgograd, VolgGASA Publ., 1997. 73 p.
5. Gorchakov G.I. *Sostav, struktura i svoystva tsementnykh betonov* [Composition, structure and properties of cement concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976. 145 p.

Нефтегазодобыча

УДК 622.276.5.001.42: 519.688

АДАПТИВНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭВОЛЮЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НЕФТЕГАЗОДОБЫЧИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Сергеев Виктор Леонидович,

д-р техн. наук, профессор кафедры геологии и разработки нефтяных
месторождений Института геологии и нефтегазового дела ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: SergeevVL@ignd.tpu.ru; SergeevVL1947@gmail.com

Наймушин Антон Георгиевич,

аспирант кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений
Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: nai-a@mail.ru

Нгуен Куинь Хуи,

магистр кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений
Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: kennho321988@gmail.com

Актуальность работы обусловлена необходимостью решения задачи структурной и параметрической идентификации феноменологических моделей процессов нефтегазодобычи.

Цель работы: разработка моделей и алгоритмов адаптивной идентификации эволюционных процессов нефтегазодобычи на основе интегрированных систем феноменологических моделей с переменными, зависящими от времени параметрами.

Методы исследований: использованы теоретические и практические разработки в области мониторинга и управления процессами нефтегазодобычи, системного анализа, идентификации систем с учетом дополнительной априорной информации, оптимизации функций и линейной алгебры. Решение задач структурной и параметрической идентификации проводилось теоретически на основе интегрированной системы феноменологической модели и экспериментально на основе промысловых данных годовой добычи нефти месторождения Томской области.

Результаты: Для решения задачи идентификации эволюционных процессов нефтегазодобычи предложено использовать интегрированные системы феноменологических моделей с учетом априорной информации с зависящими от времени параметрами. Предложены и исследованы алгоритмы адаптивной идентификации эволюционных процессов нефтегазодобычи на основе решения оптимизационных задач в условиях априорной непараметрической неопределенности, когда параметры интегрированных систем феноменологических моделей представлены неизвестными однозначными функциями времени. Показано, что учет априорной информации позволяет значительно повысить точность оценок прогноза добычи и извлекаемых запасов.

Ключевые слова:

Идентификация, адаптация, процессы нефтегазодобычи, интегрированные системы, феноменологические модели, априорная информация.

Введение

В настоящее время для решения задач мониторинга, контроля и управления разработкой месторождений нефти и газа большое значение уделяет-

ся феноменологическим динамическим моделям процессов нефтегазодобычи, представленным в общем виде нелинейными системами обыкновенных дифференциальных уравнений [1–4]

$$\frac{dY_t}{dt} = \mathbf{f}(t, Y, \alpha) \quad (1)$$

с точностью до вектора неизвестных параметров $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$. Здесь $Y_t = (y_1, y_2, \dots, y_r)$ – вектор показателей разработки (добычи нефти, газа, жидкости, воды, пластового давления и т. д.)

Однако при идентификации реальных процессов нефтегазодобычи Y_t^* , представленных, например, системой вероятностных моделей

$$Y_t^* = Y_t + \xi_t = \int_{t_0}^t \mathbf{f}(\tau, Y, \alpha) d\tau + \xi_t, \quad (2)$$

проблемными моментами являются обратные задачи структурной и параметрической идентификации, которые заключаются в определении вида функций $\mathbf{f} = (f_1, f_2, \dots, f_r)$ и параметров α в условиях действия случайных неконтролируемых факторов ξ_t и ограниченных объемах промысловых данных n .

Разнообразие и сложность процессов нефтегазодобычи требует соответствующего разнообразия и сложности моделей, отражающих их целостные системные свойства, что существенно затрудняет решение задачи структурной и параметрической идентификации [2, 3]. Усложнение структуры моделей для повышения их качества часто приводит к увеличению размерности вектора оцениваемых параметров m , что снижает эффективность алгоритмов идентификации, особенно на ранних стадиях разработки месторождений, когда объем промысловых данных мал. Например, при $m > n$ процедура параметрической идентификации является типичной некорректно поставленной обратной задачей [5].

Для решения задачи параметрической идентификации в [6, 7] предлагается использовать интегрированные системы моделей и алгоритмы идентификации с учетом дополнительной априорной информации, что обеспечивает устойчивость и повышает точность оценок на ранних стадиях разработки месторождений по сравнению с традиционными методами идентификации.

Однако актуальной является проблема структурной идентификации, для решения которой в данной работе предлагается использовать интегрированные динамические системы моделей с переменными, зависящими от времени параметрами $\alpha_t = (\alpha_1(t), \alpha_2(t), \dots, \alpha_p(t))$, и адаптивные алгоритмы идентификации. Размерность (число неизвестных, зависящих от времени параметров) таких моделей может быть значительно меньше размерности, а значит, и сложности моделей (1), (2) с постоянными параметрами, что значительно упрощает решение задачи структурной идентификации.

Модели и алгоритмы адаптивной идентификации процессов нефтегазодобычи

Решение задачи адаптивной идентификации эволюционных процессов нефтегазодобычи рассмотрим на примере интегрированной вероятност-

ной системы феноменологической модели регрессионного вида [6, 7]

$$\begin{cases} \mathbf{y}_n^* = \mathbf{y}_n + \xi_n = \mathbf{f}_0(\alpha_n) + \xi_n, \\ \bar{\mathbf{z}}_n = \mathbf{f}_a(y_n, \alpha_n) + \eta_n, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \end{cases} \quad (3)$$

состоящую из двух систем уравнений, в которых параметры $\alpha_n = (\alpha_j(t_n), j = \overline{1, m})$ – неизвестные однозначные функции времени $t_n, n = 1, 2, 3, \dots$. Первая система уравнений представляет вероятностную феноменологическую дискретную модель исследуемого процесса, где $\mathbf{y}_n^* = (y_i^*(t_i), i = \overline{1, n})$, $\mathbf{f}_0(\alpha_n) = (f_{0i}(t_i, \alpha_n), i = \overline{1, n})$ – фактические и вычисленные на основе феноменологической модели $f_0(t, \alpha)$ значения исследуемого эволюционного процесса. Вторая система – модель объектов аналогов, $\mathbf{f}_a(y_n, \alpha_n) = (f_{aj}(y_n, \alpha_n), j = \overline{1, d})$, позволяющих учитывать дополнительную априорную информацию $\bar{\mathbf{z}}_n = (\bar{z}_{kn}, k = \overline{1, d})$, известную к моменту времени t_n . Модели исследуемого процесса и модели объектов аналогов f_0, f_{aj} – известные функции (функционалы), где функция f_0 является решением уравнения вида (1); ξ_n, η_n – векторы случайных неконтролируемых факторов (процессов).

Примером (3) является интегрированная дискретная система моделей накопленной к моменту времени t_n добычи нефти (газа) $y^*(t_n)$ с учетом априорной информации об извлекаемых запасах $\bar{z}_n$ [6]

$$\begin{cases} y_i^* = f_0(t_i, \alpha(t_n)) + \xi_i = \\ = \alpha_1(t_n) / (1 - \exp(-\alpha_2(t_n)t_i)) + \xi_i, \quad i = \overline{1, n}, \\ \bar{z}_n = \int_{t_0}^{t_k} f_0(\tau, \alpha(\tau)) d\tau + \eta_n, \\ n = 1, 2, 3, \dots, \end{cases}$$

где $f_0(t, \alpha(t))$ – логистическая функция роста с зависящими от времени параметрами $\alpha(t_n) = (\alpha_1(t_n), \alpha_2(t_n))$, $n = 1, 2, 3, \dots$; t_0, t_k – время начала и завершения процесса разработки.

Следует отметить, что используемая в задачах мониторинга разработки месторождений нефти и газа логистическая функция роста $f_0(t, \alpha)$ (4) с постоянными параметрами α является решением обыкновенного дифференциального уравнения

$$\frac{dy_t}{dt} = f(t, y, \alpha) = \alpha_1 y_t (1 - \alpha_2 y_t).$$

В условиях априорной неопределенности (часто называют непараметрической неопределенностью), когда параметры модели (3) являются неизвестными однозначными функциями времени, предлагается использовать локальную аппроксимацию функции $f_0(t, \alpha)$ вида

$$f_0(t, t^*) = f_0(t, \alpha(t^*)), \quad (4)$$

где $f_0(t, \alpha(t^*))$ – известная в общем виде нелинейная функция времени, параметры которой $\alpha(t^*)$ могут быть определены в точке $t^* \in [t_1, t_n]$ с использованием данных $y_i^*, i = \overline{1, n}$, обучающего интервала обработки $(t^* - \tau) \in [t_1, t_n]$, сформированного с помощью

весовой функции $K_h((t^* - \tau)/h)$ с управляющим параметром h .

Следует отметить, что частным случаем (4) является линейная по параметрам модель, используемая в методе локальной аппроксимации (сглаживания) неизвестной зависимости $y(t)=f(x(t))$ по наблюдениям $y_i^*, x_i^*, i=1, n$ в моменты времени t_i [8, 9]

$$f(x, x^*) = \sum_{j=1}^m \alpha_j(x^*) \varphi_j(x), \quad (5)$$

где $\varphi_j(t)$ – известные функции, $\alpha_j(x^*)$ – неизвестные в некоторой точке x^* параметры.

Процесс адаптивной идентификации, заключающийся в определении параметров модели (3) с использованием локальной аппроксимации (4), полагая $t^*=t_n$, можно представить в виде последовательного решения оптимизационных задач вида [7, 10, 11]

$$\alpha_n^*(h_n, \beta_n) = \arg \min_{\alpha_n} \Phi(t_n \alpha_n, h_n \beta_n), \quad (6)$$

$$h_n^*, \beta_n^* = \arg \min_{h_n, \beta_n} J_0(t_n^* \alpha_n^*(h_n \beta_n)), \quad n=1, 2, 3, \dots, \quad (7)$$

где запись $\arg \min f(x)$ означает точку минимума x^* функции $f(x)$ ($f(x^*) = \min_x f(x)$); $\Phi(t_n, \alpha_n, h_n, \beta_n) = \Phi(J_0(t_n, \alpha_n, h), J_a(\alpha_n, \beta_n))$ – комбинированный эмпирический показатель качества системы моделей (3), представляющий заданную функцию (функционал) Φ от частного показателя качества системы моделей исследуемого процесса нефтегазодобычи

$$J_0(t_n, \alpha_n, h) = \sum_{i=1}^n K_h((t_n - t_i)/h) \psi_0(y_i^* - f_0(\alpha_n))$$

и частного критерия качества системы моделей объектов аналогов

$$J_a(\alpha_n, \beta_n) = \sum_{k=1}^d \beta_{kn} \psi_a(\bar{z}_{kn} - f_{ak}(y_n \alpha_n)),$$

где $\alpha_n^* = \alpha^*(t_n)$; $y_i^*(t_i)$, $i=1, n$ – фактические значения процессов в моменты времени t_i ; $\beta_n = (\beta_{kn}, k=1, p)$ – вектор управляющих параметров, определяющих значимость (вес) дополнительных априорных сведений $\bar{z}_{kn}$; ψ_0, ψ_a – известные функции.

Рассматриваемая технология адаптивной идентификации (6), (7) позволяет синтезировать достаточно широкий спектр алгоритмов для линейных и нелинейных интегрированных систем феноменологических моделей, а также для различных показателей качества, определяемых функциями ψ_0, ψ_a , и методов решения оптимизационных задач. Например, для линейной по параметрам $\alpha(t_n) = (\alpha_1(t_n), \alpha_2(t_n), \dots, \alpha_m(t_n))$ дискретной интегрированной системы феноменологических моделей

$$\begin{cases} y_n^* = F_0 \alpha_n + \xi_n, \\ \bar{z}_n = F_a \alpha_n + \eta_n, n=1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (8)$$

и комбинированного показателя качества, выбранного в виде суммы взвешенных с весами $K(h), W(\beta)$ частных квадратичных показателей качества

$$\Phi(t_n, \alpha, \beta) = \|y^* - F_0 \alpha_n\|_{K(h)}^2 + \|\bar{z}_n - F_a \alpha_n\|_{W(\beta)}^2 \quad (9)$$

оптимизационная задача (6) с использованием разложения (5) в точке $t^*=t_n$ сводится к решению систем линейных алгебраических уравнений вида

$$A_n \alpha_n^*(h_n, \beta_n) = B_n, \quad (10)$$

$$A_n = (F_0^T K(h_n) F_0 + F_a^T W(\beta_n) F_a);$$

$$B_n = (F_0^T K(h_n) y^* + F_a^T W(\beta_n) \bar{z}_n),$$

где запись $\|X\|_W^2$ означает квадратичную форму $X^T W X$; $y^* = (y_i^*(t_i), i=1, n)$ – вектор фактических значений процесса нефтегазодобычи $y(t)$; $\bar{z}_n = (\bar{z}_{kn}, k=1, d)$ – вектор дополнительных априорных сведений и экспертных оценок, известных к моменту времени t_n ; $F_0 = (f_{j0}(x(t_i)), j=1, m, i=1, n)$ – матрица $(m \times n)$ известных функций процесса $x(t)$, связанного с процессом $y(t)$ линейной зависимостью

$$y(t) = \sum_{j=1}^m \varphi_j(x(t)) \alpha_j(t); \quad R = (r_{ik}, j=1, m, k=1, d) - \text{известная матрица в модели объектов аналогов размерности } (d \times m);$$

$W(\beta_n) = \text{diag}(\beta_{kn}, k=1, d)$ – диагональная матрица, определяющая значимость (вес) дополнительных априорных данных $\bar{z}_n$; $K(h_n) = \text{diag}(k((t_n - t_i)/h), i=1, n)$ – диагональная матрица значений весовой функции $k((t - \tau)/h)$. Примером простейшей весовой функции является зависимость $k((t - \tau)/h) = 1$ при $t \in [(t - \tau)/h]$ и $k((t - \tau)/h) = 0$ при $t \notin [(t - \tau)/h]$. Для получения системы линейных уравнений (8) достаточно взять частные производные по параметрам α_n от комбинированного функционала (9) и приравнять их к нулю.

Адаптивная идентификация процесса добычи нефти

На рис. 1–3 и в таблице приведены результаты решения актуальной задачи анализа мониторинга и контроля разработки лицензионных участков нефтяных месторождений, прогноза добычи нефти и оценки извлекаемых запасов.

Для решения задач адаптивной идентификации, прогноза добычи и оценки извлекаемых запасов использовалась линейная интегрированная система моделей накопленной добычи нефти вида

$$\begin{cases} y_i^* = \alpha_{1n} - \alpha_{2n} x_i + \xi_i, i=1, n, \\ \bar{z}_n = \alpha_{1n} + \eta_n, n=1, 2, 3, \dots, \end{cases} \quad (11)$$

следующая из (8) при $m=2$ и $R = \text{diag}(1, 0, \dots, 0)$. Здесь $y_i^*, i=1, n$ – фактические значения накопленной добычи нефти объектов разработки к моменту времени t_n ; $x_i = q_i/y_i, i=1, n$ – отношение добычи нефти q_i за период времени $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ к накопленной с начала разработки к моменту времени t_i добыче нефти y_i ; $\bar{z}_n$ – априорная информация об извлекаемых запасах, известная к моменту времени t_n .

Фактические значения годовой добычи нефти (в тыс. т) месторождения Томской области за 15 лет разработки изображены на рис. 1–3, линия 1. Линии 2–4 (рис. 1) представляют оценки

прогнозной добычи нефти $\hat{Q}_n(t+\tau)$ начиная со второго года разработки

$$\hat{Q}_n(t_n + \tau) = \hat{y}(t_n + 1 + \tau) - \hat{y}(t_n + \tau),$$

$$n = 2, 3, 4; \tau = 1, \quad (12)$$

где

$$\hat{y}(t_n + \tau) = \alpha_{1n}^*(h_n^*, \beta_n^*) / (1 - \exp(-\frac{\alpha_{1n}^*(h_n^*, \beta_n^*)}{\alpha_{2n}^*(h_n^*, \beta_n^*)}(t_n + \tau)));$$

$\alpha_{jn}^*(h, \beta)$, $j=1, 2$ – оценки параметров модели (11), полученные на основе (6), (9), по аналогии (10), путем решения системы линейных алгебраических уравнений

$$(F_0^T K_h F_0 + \beta I) \alpha_n^*(h_n, \beta_n) = F_0^T K_h y_n^* + \beta \bar{z}_n, \quad (13)$$

в которой $F_0 = (1, x_i, i=1, n)$ – матрица размерности $(n \times 2)$; $K_h = \text{diag}(\exp((t_n - t_i)/h))$, $i=1, n-1$ – диагональная матрица весов. Оценки параметров h_n^* , β_n^* определялись путем решения оптимизационной задачи

$$h_n^*, \beta_n^* = \arg \min_{h_n, \beta_n} \|y^* - F_0 \alpha_n^*(h_n, \beta_n)\|_{K_h}^2 \quad (14)$$

методом деформированного многогранника [12].

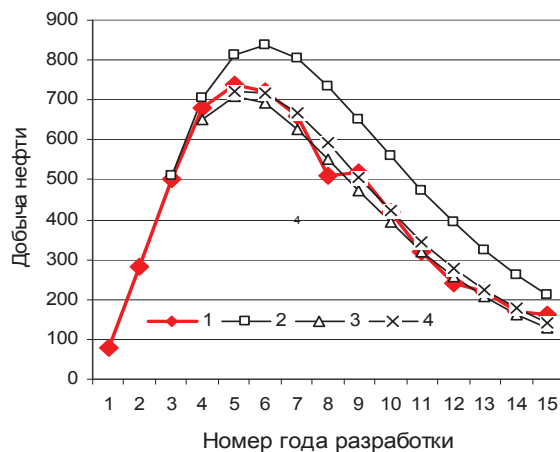


Рис. 1. Фактические (линия 1) и прогнозные значения добычи нефти (линии 2-4) с использованием метода адаптивной идентификации (13), (14)

Корректировка априорной информации о запасах $\bar{z}_n$ в модели (11) проводилась по схеме

$$\bar{z}_{n+1} = \alpha_1^*(h_n^*, \beta_n^*), n = 1, 2, \dots$$

Для сравнения качества прогноза на рис. 2 и 3 приведены прогнозные значения годовой добычи нефти

$$\hat{Q}_n(t_n + \tau) = f(t_n + \tau + 1, \alpha^*(\beta^*)) - f(t_n + \tau, \alpha^*(\beta^*)),$$

$$n = 2, 3, 4; \tau = 1, \quad (15)$$

полученные с использованием нелинейных трех- и четырех-параметрических феноменологических моделей накопленной добычи нефти с постоянными коэффициентами

$$y_i = f(t, \alpha) = \int_{t_0}^t \alpha_1 \exp(-\alpha_2 t) t^{\alpha_3} dt \quad (16)$$

$$y_i = f(t, \alpha) = \int_{t_0}^t \alpha_1 (1 - \exp(-\alpha_2 t))^{\alpha_3} \exp(-\alpha_4 t) dt \quad (17)$$

и нелинейной интегрированной системы феноменологических моделей накопленной добычи нефти с учетом априорной информации об извлекаемых запасах вида [10]

$$\begin{cases} y^* = f(\alpha) + \xi, \\ \bar{z} = f_a(t_k, \alpha) + \eta = \int_{t_0}^{t_k} f(\tau, \alpha) d\tau + \eta, \end{cases} \quad (18)$$

где $y^* = (y_i^*, i=1, n)$, $f_0(\alpha) = (f_0(t_i, \alpha), i=1, n)$ – векторы фактических и вычисленных на основе моделей (16), (17) значений накопленной добычи нефти; $\bar{z}$, $f_a(T, \alpha)$ – фактическая и вычисленная на основе моделей (16), (17) в момент завершения разработки месторождения $t_k=30$ экспертная оценка извлекаемых запасов $\bar{z}$; ξ , η – случайные неконтролируемые факторы.

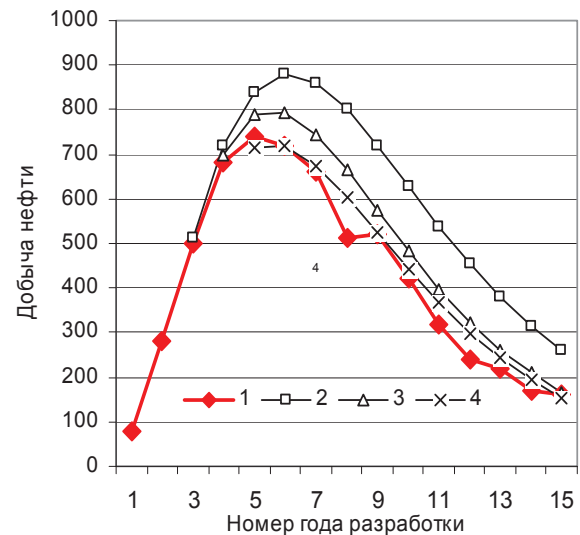


Рис. 2. Фактические (линия 1) и прогнозные значения добычи нефти (линии 2-4) с использованием МИМ (19), (20) и модели (16)

Оценки параметров интегрированной феноменологической системы моделей (18) $\alpha^*(\beta)$ и управляющий параметр β^* определялись на основе метода интегрированных моделей (МИМ) путем решения оптимизационных задач [6, 7]

$$\alpha^*(\beta) = \arg \min_{\alpha} (\|y^* - f_0(\alpha)\|^2 + \beta(\bar{z} - f_a(t_k, \alpha))^2), \quad (19)$$

$$\beta^* = \arg \min_{\beta} (\|y^* - f_0(\alpha(\beta))\|^2) \quad (20)$$

методами деформированного многогранника и золотого сечения [12]. Корректировка априорной информации о запасах $\bar{z}$ в модели (18) проводилась по схеме.

$$\bar{z}_{n+1} = f_a(t_k, \alpha_n^*(\beta_n^*)), n = 1, 2, 3, \dots$$

Из рис. 1-3 видно, что прогнозы добычи нефти (12), полученные с использованием линейной системы феноменологической модели с двумя переменными параметрами (11) и метода адаптивной

идентификации (13), (14) практически не уступают по точности долгосрочным прогнозам добычи нефти (15), полученным с использованием более сложных нелинейных феноменологических моделей (16), (17).

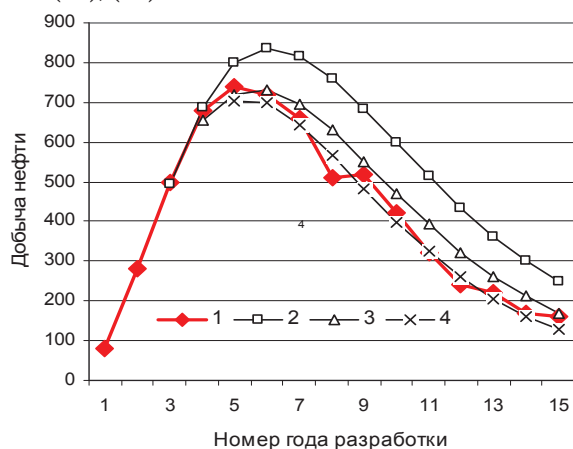


Рис. 3. Фактические (линия 1) и прогнозные значения добычи нефти (линии 2–4) с использованием МИМ (19), (20) и модели (17)

В таблице приведены значения относительных ошибок оценок извлекаемых запасов $\alpha_{1n}^*(h_n^*, \beta_n^*)$ за первые 6 лет разработки нефтяного пласта

$$\delta_n = abs(\alpha_{1n}^*(h_n^*, \beta_n^*) - \bar{z}(t_k)) / \bar{z}(t_k), n = \overline{2, 6},$$

полученные на основе метода адаптивной идентификации (МАИ) (13), (14) с использованием феноменологической модели (11) с учетом ($\beta_n = \beta_n^*$) и без учета ($\beta_n = 0$) априорной информации об извлекаемых запасах, и относительные ошибки

$$\delta_n = abs((f(t_k, \alpha_n^*(\beta_n^*)) - \bar{z}(t_k)) / \bar{z}(t_k)), n = \overline{2, 6},$$

полученные на основе метода интегрированных моделей (МИМ) (18)–(20) с использованием моделей (16), (17), с учетом и без учета априорной информации. Точные значения извлекаемых запасов за 30 лет разработки нефтяного пласта составили $\bar{z}(t_k) = 6,9 \cdot 10^6$ тонн. Априорная информация об извлекаемых запасах к началу разработки t_0 принималась равной $\bar{z}_0 = 5 \cdot 10^6$ тонн с ошибкой порядка 30 %.

Из таблицы видно, что оценки извлекаемых запасов, полученные на основе метода адаптивной идентификации с использованием линейной феноменологической модели накопленной добычи неф-

ти (11), практически не уступают по точности оценкам, полученным с использованием нелинейных феноменологических моделей (16), (17). Учет и корректировка априорной информации об извлекаемых запасах позволяет существенно повысить точность оценок.

Таблица. Относительные ошибки оценок извлекаемых запасов, %

Методы и модели	Априорная информация	Длительность разработки (номер года)				
		2	3	4	5	6
МАИ	$\beta_n = 0$	0,856	0,514	0,462	0,325	0,029
	$\beta_n = \beta_n^*$	0,486	0,249	0,148	0,084	0,063
МИМ, модель (16)	$\beta = 0$	0,803	0,519	0,336	0,273	0,017
	$\beta = \beta^*$	0,438	0,207	0,121	0,066	0,051
МИМ, модель (17)	$\beta = 0$	0,915	0,621	0,416	0,323	0,024
	$\beta = \beta^*$	0,354	0,019	0,105	0,063	0,048

Выводы

1. Для решения задачи идентификации эволюционных процессов нефтегазодобычи предложено использовать интегрированные системы феноменологических моделей с зависящими от времени параметрами с учетом дополнительной априорной информации.
2. Предложены алгоритмы адаптивной идентификации эволюционных процессов нефтегазодобычи на основе решения оптимизационных задач в условиях априорной непараметрической неопределенности, когда параметры интегрированных систем феноменологических моделей представлены неизвестными однозначными функциями времени.
3. Показано, что полученные прогнозные значения добычи и оценки извлекаемых запасов нефтяного месторождения практически не уступают по точности аналогичным оценкам, полученным с использованием более сложных нелинейных феноменологических моделей, что существенно упрощает решение задачи структурной и параметрической идентификации на ранних стадиях разработки месторождения, когда объем промысловых данных мал.
4. Учет и корректировка априорной информации позволяет значительно повысить точность оценок прогноза добычи и извлекаемых запасов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов В.А. Эволюционные уравнения как феноменологические модели разработки нефтяных залежей // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. – 2006. – С. 1–36. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Sokolov/SokolovVA_1.pdf (дата обращения: 28.08.2013).
2. Мирзаджанзаде А.Х., Хасанов М.М., Бахтизин Р.Н. Моделирование процессов нефтегазодобычи. Нелинейность. Неравномерность. Неопределенность. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 386 с.
3. Сергеев В.Л., Квескьо Б.Б., Севостьянов Д.В. Интегрированные системы идентификации для мониторинга и управления

разработкой нефтяных месторождений // в кн: Геология, разработка и эксплуатация нефтяных месторождений с трудноизвлекаемыми запасами. – М.: Изд-во «Нефть и газ», 2007. – С. 159–169.

4. Давыдов А.В. Анализ и прогноз разработки нефтяных залежей. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2007. – 316 с.
5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 392 с.
6. Наймушин А.Г., Сергеев В.Л. Идентификация эволюционных процессов жизненного цикла систем с учетом априорной информации // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 5. – С. 42–45.

7. Сергеев В.Л. Интегрированные системы идентификации. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 198 с.
8. Катковник В.Я. Линейные оценки и стохастические задачи оптимизации. – М.: Наука, 1976. – 488 с.
9. Сергеев В.Л. Об использовании оценок локальной аппроксимации плотности вероятности // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 7. – С. 56–61.
10. Журавский В.В., Сергеев В.Л. Оценка извлекаемых запасов газовых и газоконденсатных месторождений на основе метода интегрированных моделей // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 1. – С. 116–118.
11. Гаврилов К.С., Сергеев В.Л. Адаптивная интерпретация нестационарных гидродинамических исследований скважин в системе «пласт–скважина» методом интегрированных моделей // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 5. – С. 72–75.
12. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.

Поступила 02.09.2013 г.

UDC 622.276.5.001.42: 519.688

THE ADAPTIVE IDENTIFICATION IN EVOLUTIONARY PROCESSES OF OIL AND GAS PRODUCTION BASED ON INTEGRATED SYSTEMS OF PHENOMENOLOGICAL MODELS

Viktor L. Sergeev,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk,
Lenin Avenue, 30. E-mail: SergeevVL@ignd.tpu.ru; SergeevVL1947@gmail.com

Anton G. Naymushin,

Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: nai-a@mail.ru

Nguen Kuin Khui,

Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: kennho321988@gmail.com

The urgency of the discussed issue is caused by the need to resolve the problems in structural and parametric identification of phenomenological models in oil and gas production.

The main aim of the study is to develop models and algorithms for adaptive identification in evolutionary processes of oil and gas production based on integrated systems of phenomenological models with variable time-dependent parameters.

The methods used in the study are: the theoretical and practical developments in the monitoring and management of oil and gas production, system analysis, system identification with additional a priori information, optimization of functions and linear algebra. The problems in structural and parametric identification were solved theoretically based on integrated systems of phenomenological models and experimentally based on field data of oil annual output field in Tomsk region.

The results: The authors proposed to use the integrated systems of phenomenological models based on a priori information with variable time-dependent parameters in order to solve problems of identification in evolutionary process of oil and gas production. They proposed and investigated algorithms of adaptive identification in evolutionary processes of oil and gas production on the basis of solving optimization problems under conditions of a priori nonparametric uncertainty, when the parameters of the integrated systems of phenomenological models are presented by unknown unambiguous time functions. It was shown as well that the inclusion of a priori information can improve significantly the accuracy in estimating forecast production and recoverable reserves.

Key words:

Identification, adaptation, oil and gas production, integrated systems, phenomenological models, a-priori information.

REFERENCES

1. Sokolov V.A. *Evolutsionnye uravneniya kak fenomenologicheskie modeli razrabotki neftyanykh zalezhey* [Evolution equations as phenomenological models of development of oil fields]. *Neftegazovoe delo – Petroleum Engineering, electronic scientific journal*, 2006, pp.1–36. Available at: http://www.ogbus.ru/authors/Sokolov/SokolovVA_1.pdf (accessed 28 August 2013).
2. Mirzadzhanzade A.Kh., Khasanov M.M., Bakhtizin R.N. *Modelirovanie protsessov neftegazodobychi. Nelineynost. Neravnovesnost. Neopredelennost* [Modelling of oil and gas production processes. Nonlinearity. Nonequilibrium. Uncertainty]. Moscow: Izhevsk, Institute of Computer Science, 2004. 386 p.
3. Sergeev V.L., Kvesko B.B., Sevostyanov D.V. *Integrirovannye sistemy identifikatsii dlya monitoringa i upravleniya razrabotkoy neftyanykh mektorozhdeniy* [Integrated identification system for monitoring and managing the development of oil deposits]. *Geologiya, razrabotka i ekspluatatsiya neftyanykh mektorozhdeniy s trudnoizvlekaemyimi zapasami* [Geology, development and exploitation of oil fields with hard-stock]. Moscow, Neft i gaz Publ., 2007. pp. 159–169.
4. Davydov A.V. *Analiz i prognoz razrabotki neftyanykh zalezhey* [Analysis and forecast of development of oil fields]. Moscow, VNIIOENG Publ., 2007. 316 p.
5. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods of solving ill-posed problems]. Moscow, Nauka, 1979. 392 p.

6. Naymyshin A.G., Sergeev V.L. Identifikatsiya evolyutsionnykh protsessov zhiznennogo tsikla system s uchetoм apriornoy informatsii [Identification in evolutionary processes of life cycle considering priori information]. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 5, pp. 42–45.
7. Sergeev V.L. *Integrirovannye sistemy identifikatsii* [Integrated identification system]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2011. 198 p.
8. Katkovnik V.Ya. *Lineynye otsenki i stokhasticheskie zadachi optimizatsii* [Linear estimation and stochastic optimization problem]. Moscow, Nauka, 1976. 488 p.
9. Sergeev V.L. Ob ispolzovanii otsenok lokalnoy approksimatsii plotnosti veroyatnosti [The use of estimates of the local approximation of probability density]. *Automatics and telemekhanics*, 1979, no. 7, pp. 56–61.
10. Zhuravskiy V.V., Sergeev V.L. Otsenka izvlekaemykh zapasov gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniy na ocnove metoda integrirovannykh modeley [The estimated recoverable reserves of gas and gas condensate fields based on integrated modelling method]. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 1, pp. 116–118.
11. Gavriloв K.S., Sergeev V.L. Adaptivnaya interpretatsiya nestatsionarnykh gidrodinamicheskikh issledovaniy kvvazhin v sisteme «plast-skvazhina» metodom integrirovannykh modeley [Adaptive interpretation of transient well testing in system «reservoir-well» by integrated modelling method]. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 5, pp. 72–75.
12. Pantelev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh* [Optimization methods in examples and problems]. Moscow, Higher school, 2002. 544 p.

Геоэкология

УДК 551.578.4; (502.7)

МИНЕРАЛЬНЫЙ И ГЕОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТВЕРДОГО ОСАДКА В СНЕГОВОМ ПОКРОВЕ Г. БЛАГОВЕЩЕНСК (АМУРСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Юсупов Дмитрий Валерьевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геоэкологии и геохимии
Института природных ресурсов ТПУ. Россия, 634050,
г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: yusupovd@mail.ru

Степанов Виталий Алексеевич,

д-р геол.-минерал. наук, профессор, главный научный сотрудник
Научно-исследовательского геотехнологического центра ДВО РАН, Россия,
683002, г. Петропавловск-Камчатский,
Северо-Восточное шоссе, 30, а/я 56. E-mail: vitstepanov@yandex.ru

Трутнева Наталья Васильевна,

начальник Амурского отделения филиала «ДВ РЦ ГМСН»
ФГУП «Гидроспецгеология», г. Благовещенск. E-mail: trutnevanv@mail.ru

Могилёв Артём Андреевич,

студент кафедры геологии и природопользования Амурского
государственного университета, Россия, 675027, г. Благовещенск,
Игнатьевское шоссе, 21. E-mail: mogilev-ilin@mail.ru

Актуальность работы обусловлена тем, что г. Благовещенск (Амурская область) в 2010 г. отнесен к городам Российской Федерации с высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха.

Цель работы: изучить минеральный и геохимический состав твердых частиц, накапливаемых в снеговом покрове г. Благовещенск.

Методы исследования: применены микроскопический, рентгенографический, атомно-эмиссионный, масс-спектральный с индуктивно-связанной плазмой методы анализа.

Результаты: урбанизированная территория города в зимний период испытывает на себе существенную нагрузку в виде среднего суточного выпадения аномального количества пыли и химических элементов. Определены фазы природного (кварц, альбит, анортит, микроклин и др.) и техногенного (сажа, амальгама магния, селенид рубидия, молибдена и др.) генезиса. Частицы угля в твердом осадке снега являются основными концентраторами токсичных и радиоактивных элементов.

Ключевые слова:

Пылеаэрозоли, снеговой покров, минеральный состав, рентгенографический, атомно-эмиссионный, масс-спектральный методы анализа, токсичные и радиоактивные элементы.

Введение

Ввиду высокой сорбционной способности снег аккумулирует частицы пыли техногенного и природного происхождения. Изучение пылеаэрозолей актуально для Благовещенска Амурской области в связи с тем, что в 2010 г. город отнесен к городам Российской Федерации с высоким уровнем загряз-

нения атмосферного воздуха [1]. Изучение пылеаэрозолей с использованием минералого-геохимических методов анализа позволило впервые получить данные об их составе в снеговом покрове г. Благовещенск.

Благовещенск является административным центром Амурской области, он расположен на гра-

нице с КНР и слиянии двух крупных рек – Амура и Зеи. Территория города приурочена к юго-западной окраине Нижне-Зейской впадины, зоне сочленения Благовещенского поднятия и Дмитриевского прогиба. Фундамент впадины сложен раннепалеозойскими и раннемеловыми интрузивными образованиями. Осадочный чехол представлен песчано-глинистыми отложениями мелового и кайнозойского возраста [2].

Площадь урбанизированной территории занимает порядка 57,8 км², с численностью населения около 215 тыс. чел. Основными источниками загрязнения воздуха на территории города являются работающие на буром угле Благовещенская ТЭЦ, а также отопительные котельные коммунального хозяйства, заводы «Амурский металлист», судостроительный, мельзавод, предприятия железнодорожного транспорта. Валовый выброс загрязняющих веществ в атмосферу Благовещенской ТЭЦ в 2011 г. составил более 33 тыс. тонн, из них твердых – порядка 8,8 тыс. тонн [3].

Методы исследований

На территории г. Благовещенск в марте 2012 г. по радиальной сети от основного источника выбросов – ТЭЦ, с учетом розы ветров (преобладают северо-западные ветры) отобраны 32 пробы снега. Местный фон характеризуют пробы, отобранные в 4 и в

35 км севернее города с наветренной стороны. Пробы, весом от 6 до 12 кг отбирались на всю мощность снегового покрова, исключая 5 см приземного слоя [4]. Затем пробы снега топили и фильтровали.

Минеральный состав осадка проб изучался под бинокляром Stemi 2000-C и микроскопом ПОЛАМ Р-211 в Институте геологии и природопользования ДВО РАН (аналитик канд. геол.-минерал. наук Л.И. Рогулина, г. Благовещенск), рентгенофазовым анализом в аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН (аналитик канд. геол.-минерал. наук А.А. Карабцов, г. Владивосток). Химический состав твердой фазы пылеаэрозолей в снеге определяли атомно-эмиссионным и масс-спектральным с индуктивно-связанной плазмой методами в Аналитическом испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (аналитик канд. хим. наук В.К. Карандашев, г. Черноголовка).

Результаты

Водородный показатель талой снеговой воды меняется в нешироких пределах от 6,62 до 9,17, среднее из 35 определений – 7,11, то есть вода в среднем обладает нейтральной реакцией; лишь в двух пробах: Ам-1 (pH 9,17) и Ам-12 (pH 8,87) – слабо щелочной. Основными примесями в снего-

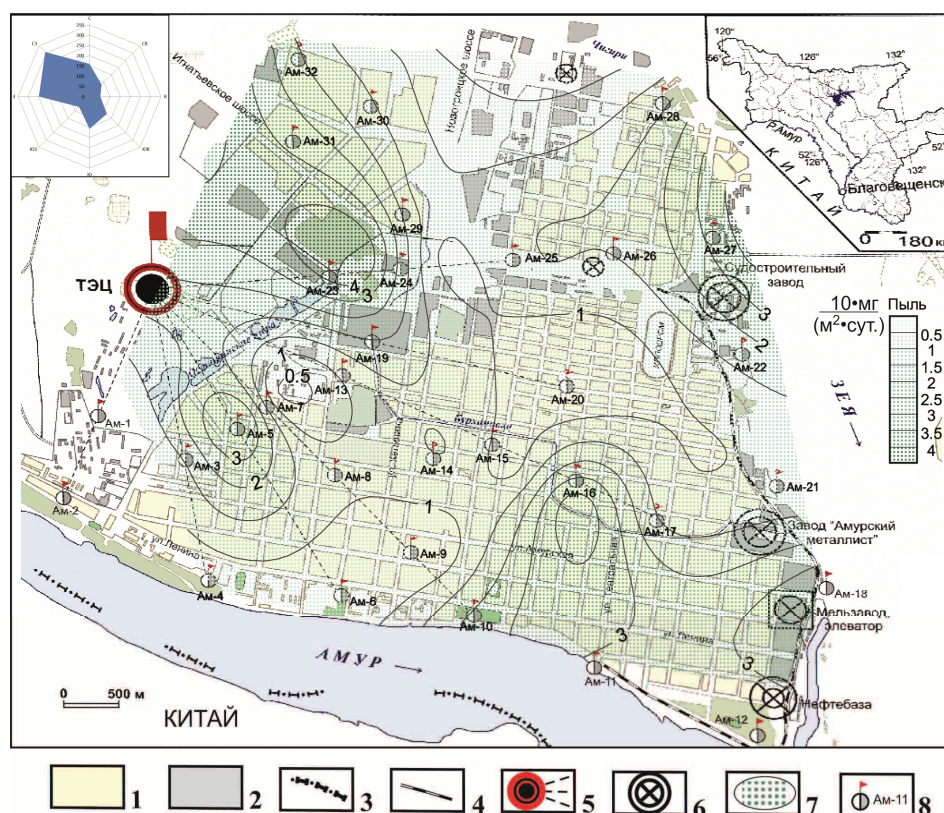


Рис. 1. Схема опробования снегового покрова и распределение пылевой нагрузки на территории г. Благовещенск: 1) селитебная территория; 2) территория промышленных предприятий; 3) Государственная граница России с Китаем; 4) железная дорога; 5) ТЭЦ и подфакельные направления выбросов; 6) заводы, производственные базы, котельные; 7) изолинии пылевой нагрузки (10 мг/м²·сут.), 8) места отбора снеговых проб и их номера

вой воде являются (мг/л): Ca (12,0–56,0), S (2,0–28,0), K (1,0–10,0), в меньшей степени Mg (0,5–3,0) и Si (0,2–1,0). В свежеснеговом снеге и снеге, отобранном за пределами города, концентрация этих и других примесей в снеговой воде значительно ниже.

В зимний период пылевая нагрузка на территорию г. Благовещенск составляет от 3 до 43 мг/м²·сут., в среднем – 17 мг/м²·сут. Фоновая пылевая нагрузка за пределами города – от 0,3 до 3,1 мг/м²·сут. Ореолы максимальной пылевой нагрузки наблюдаются на территории северо-западной промышленной зоны до 2 км от трубы ТЭЦ по розе ветров, а также вдоль правого берега р. Зей, где размещены основные транспортные узлы, предприятия «Амурский металлист», судостроительный завод, мельзавод, элеватор и нефтебаза (рис. 1).

Основную часть твердого осадка снега составляют частицы угля, кристаллы кварца и полевого шпата (менее 0,1 мм). В некоторых пробах присутствуют значимые количества светлой слюды, гидрогетита, магнитных сферул, реже кальцита (?). В знаковых количествах отмечаются амфиболы и пироксены, алюмосиликатные сферулы, а также семена и сухая биомасса растений, техногенное стекло и металлическая стружка (табл. 1).

Таблица 1. Минеральный состав твердого осадка снега в г. Благовещенск

Наименование материала	Номера проб, содержание в %			
	Ам-28	Ам-1	Ам-1	Ам-16
Уголь	75	62	12	5
Кварц	13	9	42	94
Полевой шпат каолинизированный	11	24	37	1
Слюды светлые	–	ед. зн.	6	–
Гидрогетит	ед. зн.	4	–	ед. зн.
Кальцит (?) «обожженная известь»	–	ед. зн.	1	–
Амфибол	–	ед. зн.	–	–
Пироксен	–	ед. зн.	–	–
Магнитные сферулы	1	1	2	ед. зн.
Алюмосиликатные сферулы	–	–	ед. зн.	ед. зн.
Сумма	100	100	100	100

Примечание: «–» – не обнаружено; ед. зн. – единичные знаки. Минералогический анализ проводился шлиховым и иммерсионным методами с применением микрохимических реакций.

Пробы снега с осадком черного цвета (Ам-1 и Ам-28) отобраны вблизи (несколько сотен метров) ТЭЦ и одной из котельных города. Осадок черного цвета на 62...75 % состоит из тонких обломков угля. В темно-сером осадке из проб (Ам-11 и Ам-16), отобранных на значительном (2...3 км) расстоянии от ТЭЦ и котельных, преобладают кварц и полевой шпат, а количество частиц угля снижается до 5...12 %.

Микрочастицы угля в пробах встречаются двух разновидностей: блестящие со слоистой структурой и матовые с микрозернистой структурой. При обработке проб частицы угля уходят в электромаг-

нитную, частично и в магнитную фракции, что не типично для угля. Гидрогетит проявляет магнитные и электромагнитные свойства. Он имеет ксеноморфную, пластинчатую и призматическую формы, вероятно, образован по темноцветным минералам. Полевые шпаты интенсивно каолинизированы. После двухсуточного нахождения в иммерсионной жидкости они превращаются в гелеобразную массу, чего не бывает с природными частицами этих минералов. Кальцит встречается в виде белых непрозрачных зерен.

Таблица 2. Статистические параметры валового содержания оксидов (масс. %) и элементов (мкг/г) в твердом осадке снежного покрова г. Благовещенск (n=35)

Элемент	Содержание (среднеарифметическое)	Min	Max	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации
Na ₂ O	1,44±0,19	0,23	2,20	0,57	40
MgO	1,05±0,10	0,16	1,81	0,30	29
Al ₂ O ₃	12,9±0,85	2,11	16,7	2,50	19
P ₂ O ₅	0,21±0,02	0,06	0,43	0,07	33
S _{общ}	0,18±0,02	0,01	0,32	0,07	39
K ₂ O	1,96±0,22	0,31	3,07	0,64	33
CaO	4,59±0,60	0,39	9,74	1,77	39
TiO ₂	0,45±0,03	0,09	0,57	0,09	20
MnO	0,16±0,02	0,02	0,29	0,06	38
Fe ₂ O ₃	4,94±0,49	0,74	8,29	1,45	29
1 класс опасности					
Pb	89,49±12,56	29,80	185,27	37,20	42
Cd	0,73±0,20	0,13	3,62	0,59	81
Zn	494,1±71,6	144,1	898,9	211,7	43
As	12,06±2,01	0,10	32,37	5,95	49
Se	3,0±0,4	0,5	6,2	1,3	43
Hg	0,136±0,030	0,021	0,410	0,090	66
2 класс опасности					
Co	24,6±3,8	2,7	51,4	11,2	45
Ni	58,4±6,5	20,0	93,0	19,3	33
Mo	3,66±0,35	0,78	5,04	1,04	28
Sb	4,52±0,56	0,76	8,01	1,66	37
Cu	85,2 ±15,6	13,9	212,0	46,0	54
Cr	44,3±3,9	14,3	69,6	11,4	26
3 класс опасности					
Ba	1569,3±154,9	155,4	2570,7	455,1	29
V	64,0±7,7	0,6	119,7	22,6	35
W	6,41±0,99	1,04	15,45	2,92	46
Sr	475,05±74,7	52,83	1416,8	220,9	47
циклические и рассеянные элементы					
Be	7,59±0,98	0,82	13,50	2,91	38
Sc	9,8±1,0	2,1	19,5	3,0	31
Ag	0,32±0,12	0,08	1,84	0,34	106
Sn	3,9±0,4	0,4	6,1	1,2	31
Cs	3,710±0,40	0,940	8,40	1,18	32
радиоактивные элементы					
Th	15,45±1,51	2,33	24,30	4,46	29
U	3,930±0,420	0,60	6,220	1,25	32

Примечание: n – количество проб в выборке.

При рентгенографическом исследовании твердого осадка снега были установлены фазы природного и техногенного происхождения. Осадок пода-

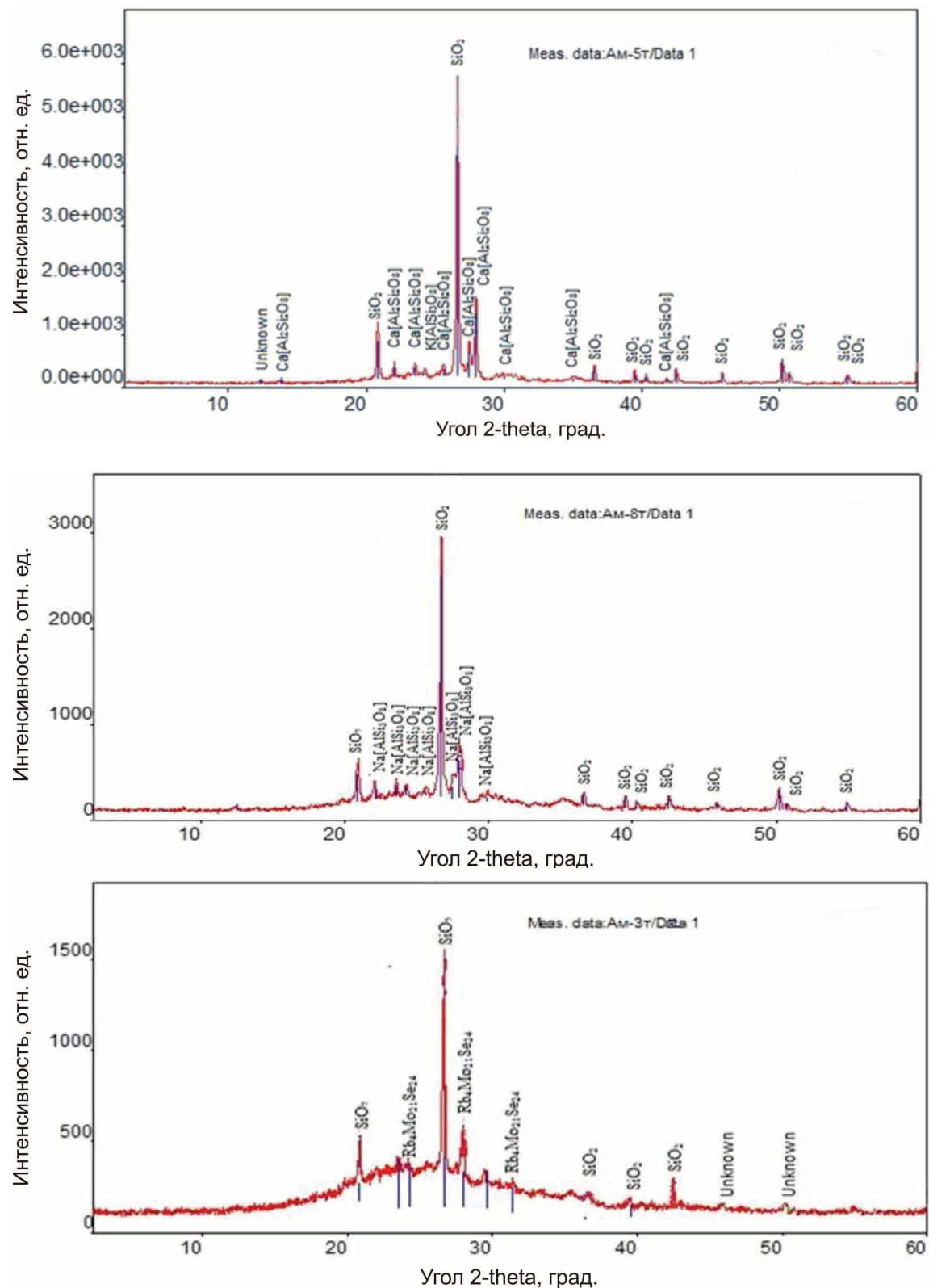


Таблица 3. Содержание породообразующих оксидов в пробах твердого осадка снега с разным содержанием частиц угля

№ пробы	Содержание частиц угля, %	Содержание породообразующих оксидов, масс. %									
		Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	S _{общ.}
Ам-28	75	13,0	6,0	1,1	6,2	0,42	1,2	0,7	0,24	0,11	0,24
Ам-1	62	14,1	6,0	1,1	6,2	0,48	1,5	0,9	0,26	0,10	0,22
Ам-11	12	13,3	2,4	0,8	3,7	0,40	2,8	2,1	0,10	0,14	0,05
Ам-16	5	9,8	2,1	0,5	2,4	0,28	2,7	1,9	0,07	0,13	0,05
Фон		2,1	0,4	0,2	0,7	0,09	0,3	0,2	0,02	0,06	0,01

Таблица 4. Содержание элементов-примесей в пробах твердого осадка снега с разным содержанием частиц угля

№ пробы	Содержание частиц угля, %	Содержание элементов-примесей, мкг/г										
		Ni	Cu	Zn	Pb	Sn	W	Ag	As	Sb	Hg	U
Ам-28	75	93,0	54,4	394	71,3	3,4	6,1	0,24	14,1	3,7	0,068	4,6
Ам-1	62	80,4	48,2	413	61,3	3,2	3,3	0,12	10,1	2,9	0,075	4,2
Ам-11	12	36,0	46,8	203	40,2	1,9	3,5	0,11	11,0	2,5	0,120	2,7
Ам-16	5	20,0	64,1	209	57,3	3,1	2,2	0,08	5,7	3,3	0,060	1,8
Фон		38,0	12,9	144	29,8	0,4	1,0	0,15	2,4	0,8	0,025	0,6
Кларк в бурых углях		9,0	15,0	18,0	6,8	0,8	1,3	0,09	7,6	0,8	0,10	2,9

Содержания породообразующих оксидов, тяжелых металлов трех классов опасности, циклических, рассеянных и радиоактивных элементов в твердом осадке снега по данным масс-спектрально-го и атомно-эмиссионного с индуктивно-связанной плазмой анализа приведены в табл. 2.

Сравнительный анализ содержания породообразующих оксидов и рудных элементов в твердом осадке с разным содержанием частиц угля показал (табл. 3 и 4), что с увеличением в пробах количества угольных частиц происходит отчетливое возрастание содержания породообразующих оксидов (масс. %): CaO (2,1–6,0), MgO (0,5–1,1), Fe₂O₃ (2,4–6,2), TiO₂ (0,28–0,48), MnO (0,07–0,26), а также серы (0,05–0,24). Одновременно в пробах уменьшается содержание (масс. %): K₂O (2,8–1,2), Na₂O (2,1–0,65) и P₂O₅ (0,14–0,11). Концентрация рудных элементов-примесей также возрастает в твердом осадке, обогащенном углем (в мкг/г): Ni (20–93), Zn (203–394), Pb (40,2–71,3), Ag (0,08–0,24), As (5,7–14,1), W (2,2–6,1), U (1,8–4,6). Содержания олова и ртути существенно не меняются.

По отношению к кларковым содержаниям этих элементов в бурых углях [5] наблюдается существенное увеличение в пробах с большим содержанием угольных частиц содержания никеля, меди, цинка, свинца, олова, вольфрама, серебра, мышьяка, сурьмы и урана. Ртуть содержится в концентрациях близких к кларку.

Выводы

Проведенные минералого-геохимические исследования твердого осадка снегового покрова г. Благовещенск показали, что урбанизированная территория города в зимний отопительный период испытывает на себе существенную нагрузку в виде среднесуточного выпадения аномального количества пыли и химических элементов природного и техногенного происхождения из атмосферы на снеговой покров. Ореолы максимальной пылевой нагрузки выявлены на территории северо-западной промыш-

ленной зоны, где расположены ТЭЦ и производственные базы, а также вдоль правого берега р. Зея, где размещены основные транспортные узлы, предприятия машиностроения и пищевой промышленности. На распространение загрязнения с атмосферным воздухом на территории Благовещенска существенно влияют преобладающее направление ветра, орография и характер застройки города.

По составу выделены две основные разновидности пылевых выпадений: 1) минеральная с преобладанием кварца и полевого шпата, источником которых являются природные комплексы пород, песчаные отмели берегов рек, открытые карьерные выработки, строительные площадки и др. и 2) преимущественно углеродистая с преобладанием частиц угля, источником эмиссии которых являются ТЭЦ и котельные предприятий города. Наблюдается пропорциональная зависимость роста содержаний основных породообразующих оксидов и элементов-примесей от увеличения в пробах содержания угольной пыли. Частицы угля в твердом осадке снега являются основными концентраторами токсичных и радиоактивных элементов.

Остается невыясненным вопрос о происхождении искусственных соединений амальгамы магния, селенида рубидия и молибдена, обнаруженных в твердом осадке снега на территории большого комплекса. Детальное изучение минерального вещества в составе снега, в том числе с применением методов электронной микроскопии, позволит установить количественные параметрические характеристики твердофазных выпадений и более точно идентифицировать источники загрязнения на территории г. Благовещенск.

Работа выполнена по заданию Минобрнауки РФ по теме НИР № 01201262055: «Зонирование урбанизированных территорий по данным литохимической и снеговой съемки (на примере г. Благовещенск Амурской области)».

Авторы глубоко признательны Л.И. Рогулиной, А.А. Карабцову и В.К. Карандашеву за помощь в выполнении аналитических работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2010 г.». – М.: МПР РФ, 2011. – 571 с.
2. Кузьменко С.П. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Серия Амуро-Зейская. Лист М-52-XIV (Благовещенск). Объяснительная записка. – М.: ВСЕГЕИ, 1983.
3. Государственный доклад «Об охране окружающей среды и экологической ситуации в Амурской области за 2011 год». – Благовещенск: МПР Амурской обл., 2012. – 200 с.
4. ГОСТ 17.1.5.05–85 Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 26 с.
5. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. – Екатеринбург: УРО РАН, 2006. – 538 с.

Поступила 26.09.2013 г.

UDC 551.578.4; (502.7)

MINERAL AND GEOCHEMICAL COMPOSITION OF DUST AEROSOLS IN SNOW COVER OF BLAGOVESHCHENSK CITY (AMUR REGION)

Dmitry V. Yusupov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: yusupovd@mail.ru.

Vitaly A. Stepanov,

Dr. Sc., Research Geotechnological Center, Far East Branch,
Russian Academy of Sciences, Russia, 683002, Petropavlovsk-Kamchatskii,
Severo-Vostochnoe shosse, 30. E-mail: vitstepanov@yandex.ru.

Natalya V. Trutneva,

Resources Management Agency Far East regional center of the state monitoring
of a condition of a subsoil, Blagoveshchensk. E-mail: trutnevanv@mail.ru.

Artem A. Mogilev,

Amur State University, Russia, Blagoveshchensk, 675027,
Ignatyevskoe shosse, 21. E-mail: mogilev-ilin@mail.ru.

The urgency of the discussed issue is caused by the fact that Blagoveshchensk (Amur region) is referred to the cities of the Russian Federation with the highest level of atmospheric air pollution in 2010.

The main aim of the study is to investigate mineral and geochemical composition of solid precipitation accumulated in snow cover of Blagoveshchensk city.

The methods used in the study: microscopic, X-ray analysis, atomic-emission analyses and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP) were used to study the samples.

The results: In winter in urbanized territory of the city an average fall of abnormal quantity daily of dust and chemical elements is very high. The authors have determined the natural (quartz, albite, anorthite, microcline and others) and technogenic (soot, amalgam magnesium, rubidium molybdenum selenide and others) phases of genesis. The coal particles of snow are the main concentrators of toxic and radioactive elements.

Key words:

Dust-aerosols, snow cover, mineral composition, microscopic, roentgenographic, atomic-emission analyses and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP) analyses, toxic and radioactive elements.

REFERENCES

1. Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2010» [The state report on the state and protection of the environment in the Russian Federation in 2010]. Moscow, Ministerstvo prirodnikh resursov i ekologii RF, 2011. 571 p.
2. Kuzmenko S.P. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200000. Seriya Amuro-Zeskaya. List M-52-XIV (Blagoveshchensk) [State geological USSR card of scale 1:200000. Series Amuro-Zeysky. Sheet M-52-XIV (Blagoveshchensk)]. Moscow, VSEGEI Publ., 1983.
3. Gosudarstvenny doklad «Ob okhrane okruzhayushchey sredy i ekologicheskoy situatsii v Amurskoi oblasti za 2011 god» [The state report on environmental protection and ecological situation in Amur region for 2011]. Blagoveshchensk, MNR Amurskoi obl., 2012. 200 p.
4. GOST 17.1.5.05–85. Obshchie trebovaniya k vyboru prob po-verkhnostnykh i morskikh vod, lda i atmosferynykh osadkov [General requirements to sampling of surface and sea water, ice and atmospheric precipitation]. Moscow, Standartinform Publ., 1985. 26 p.
5. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. Tsennyye elementy-primesi v uglyakh [Valuable accompanying elements in coals]. Ekaterinburg, URB RAS, 2006. 538 p.

УДК 556.314.6:628.112(571.151)

ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ПИТЬЕВЫХ ВОД РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ

Робертус Юрий Владимирович,

канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотр. Института водных
и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, Алтайский край,
г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. E-mail: ariecol@mail.gornyy.ru

Рихванов Леонид Петрович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии
Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: rikhvanov@tpu.ru

Соктоев Булат Ринчинович,

аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных
ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: bulatsoktoev@gmail.com

Актуальность работы обусловлена возможностью применения накипи питьевых вод как индикатора качества воды и особенностей водовмещающих пород.

Цель работы: Изучение особенностей накопления химических элементов (тяжелых металлов, редких, редкоземельных и радиоактивных элементов) в солевых отложениях, формирующихся в бытовых условиях при кипячении воды. Исследования проводились на территории Республики Алтай.

Методы исследования: Основным методом определения элементного состава являлся инструментальный нейтронно-активационный анализ.

Результаты: Выделена региональная специфика накипи из населенных пунктов Республики Алтай. Распределение химических элементов зависит от литологического состава водовмещающих пород: максимальные концентрации халько- и литофильных элементов приурочены к глинистым отложениям; Na, Zn, Br – к базальтовым и андезит-базальтовым порфиритам; Fe, Cr, Co – к карбонатным фациям. Для разновозрастных водовмещающих геологических формаций также наблюдается геохимическая специализация накипи подземных вод. Показано, что элементный состав солевых отложений наследует химический состав подземных вод, используемых в питьевых целях. Делается вывод о том, что показатели накопления элементов в накипи могут быть использованы для уточнения геохимической специализации водовмещающих образований, а ее химический состав – как показатель качества питьевых вод.

Ключевые слова:

Республика Алтай, подземные питьевые воды, накипь, особенности химического состава.

В последние годы качество подземных питьевых вод, используемых для централизованного водоснабжения более 80 % жителей Республики Алтай (РА), является предметом экологического и социально-гигиенического мониторинга, проводимого по линии Минприроды России и Роспотребнадзора соответственно.

Возраст водовмещающих пород на территории РА варьируется от рифея до голоцена, но преобладают водоносные комплексы в кембрийско-девонских осадочных и осадочно-вулканогенных толщах складчатого фундамента, а также водоносные горизонты среди неоген-четвертичных аллювиальных отложений межгорных впадин и долин крупных рек [1]. Несмотря на разнообразие литолого-стратиграфических и структурно-тектонических особенностей водоносных горизонтов (комплексов, блоков, зон), химический состав подземных вод имеет в целом выдержанный характер. По химическому составу подземные воды РА относятся к типу пресных (средняя минерализация 0,4 г/дм³) нейтральных (рН 7–8) существенно гидрокарбонатных натриево-магниевых-кальциевых среднеже-

стких вод (4,5 мг-экв.). В физиологическом отношении их отличает не всегда оптимальная минерализация, дефицит йода и фтора [2, 3].

Отметим, что на территории РА в настоящее время отсутствуют промышленные предприятия, поэтому техногенного загрязнения подземных вод не происходит.

Предыдущими исследованиями [4–6] установлено, что одним из объективных показателей качества питьевой воды является химический состав ее солевых отложений (накипи), образующихся на стенках теплообменных аппаратов (паровых котлов, водонагревателей и др.). В частности, установлено, что состав накипи из бытовой нагревательной посуды (чайников, кастрюль) адекватно отражает уровни присутствия большого спектра химических элементов в воде, в том числе многих тяжелых металлов, РЗЭ, лантаноидов, не оцениваемых в процессе вышеотмеченного эколого-гигиенического мониторинга.

В 2012 г. авторами проведено изучение элементного состава солевых отложений (накипи) подземных питьевых вод из водозаборных сква-



Рис. 1. Схема изученности накипи подземных питьевых вод в Республике Алтай

жин на территории 49 населенных пунктов во всех административных районах Республики Алтай (рис. 1). В каждом пункте взято по одной пробе накипи, общее число проб составило 49 шт.

Отбор и подготовка проб к анализу осуществлялась в соответствии с рекомендациями, изложенными в патенте «Способ определения участков загрязнения ураном окружающей среды» [7]. Согласно инструкциям, пробы накипи отбирались из бытовой посуды, в которой кипятилась вода, например, из эмалированных и пластиковых чайников, кастрюль, котлов, самоваров. При невозможности отбора пробы простым постукиванием применялся нож из нержавеющей стали для снятия накипи со стенок посуды. В каждом случае фиксировался тип посуды и глубина залегания водоносного горизонта, откуда бралась питьевая вода.

Пробоподготовка образцов накипи к элементному анализу включала в себя несколько стадий. Для начала проба высушивалась при комнатной температуре, далее истиралась в агатовой ступке до состояния пудры и в конце развешивалась в пакетики из алюминиевой фольги по 100 мг каждой пробы.

Методом определения элементного состава солевых отложений питьевых вод являлся инструментальный нейтронно-активационный анализ на 28 химических элементов, проведенный на исследовательском реакторе ИРТ-Т в лаборатории ядерно-геохимических методов исследования Томского политехнического университета (аналитики А.Ф. Судыко, Л.Ф. Богутская). В качестве контроля использовался стандартный образец (ГСО 7126-94) состава байкальского ила БИЛ-1.

Основу изученного химического состава солевых отложений (накипи) подземных питьевых вод РА составляет кальций (95,5 % от состава), в меньшей степени железо (3 %), цинк (0,7 %) и

стронций (0,5 %). Минеральный состав накипи пока не изучен. По данным [8], кальций представлен его карбонатом (арагонит), а железо – гидроокислом.

Диапазон концентраций химических элементов в накипи составляет от 5 раз (кальций) до 4 порядков (Co, As, Sb) при преобладании разброса в 2–3 порядка. Минимальные уровни присутствия (сотые-тысячные г/т) проявлены для золота, максимальные (первые десятки весовых %) – для кальция. По величине коэффициента вариации изученные химические элементы условно делятся на 4 группы (табл. 1): 1 – Ca ($V < 50\%$), 2 – Br, Sr, Ag, Ce, Nd, Lu, U ($V = 50 \dots 100\%$), 3 – Na, Zn, Ba, Sc, Rb, PЗЭ, Au, Th ($V = 100 \dots 300\%$), 4 – Fe, Cr, Co, As, Sb ($V > 300\%$).

Для кальция – субстрата накипи, присущ выдержанный характер распределения, а для ряда лито- и сидерофильных элементов – крайне невыдержанное распределение. Кроме кальция все изученные элементы характеризуются логарифмически нормальным распределением, устанавливаемым по линейным графикам накопленных частот встречаемости их содержания (рис. 2). Для большинства химических элементов в самой верхней части графиков их распределения проявлен Г-образный излом, указывающий на наличие второстепенного максимума аномально повышенных концентраций. Последние, как правило, отмечены в пробах накипи подземных вод среди зон рассеянной минерализации, первичных литохимических ореолов, что указывает на унаследованный характер состава накипи от геохимических особенностей водовмещающих толщ.

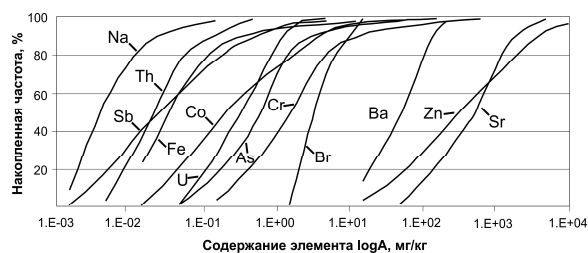
Анализ распределения изученных химических элементов в накипи подземных вод среди различных литофаций показал, что максимальные концентрации (в 2,5–15 раз выше среднего) большин-

Таблица 1. Параметры распределения элементов (г/т) в накипи подземных вод ($n=49$)

Параметр	Ca	Na	Fe	Cr	Co	Zn	As	Sb	Ba	Sr	Br	La	Ce	Nd	Sm	Yb	Au	Th	U
min	4,5	0,001	0,01	0,12	0,07	10	0,05	0,003	22	60	1,5	0,01	0,02	0,5	0,01	0,00	0,001	0,01	0,5
max	30,6	0,130	16,50	634,9	235,3	13931	150,2	10,99	1247	7007	17,8	2,03	3,56	14,6	0,48	0,21	0,030	0,65	48,2
$\bar{X}$	26,1	0,018	0,82	22,6	14,0	2048	5,4	0,48	151	1546	7,9	0,34	0,80	4,1	0,10	0,04	0,004	0,10	10,9
σ , г/т	4,5	0,026	3,02	93,0	44,6	3172	21,5	1,61	188	1415	4,0	0,39	0,72	2,5	0,11	0,05	0,004	0,14	8,9
V, %	17	146	366	411	320	155	396	337	125	92	51	116	89	62	107	120	106	140	82

Примечание: содержание кальция, натрия и железа в вес. %.

ства халько- и литофильных элементов проявлены в глинистых породах крупных межгорных впадин. Для накипи вод среди базальтовых и андезитовых порфиритов характерен высокий уровень присутствия натрия, цинка и брома, а среди карбонатных фаций – железа, хрома и кобальта (табл. 2).

**Рис. 2.** Графики распределения химических элементов в накипи подземных вод РА

Для разновозрастных водовмещающих геологических формаций также наблюдается геохимическая специализация накипи подземных вод. Так, наиболее высокими концентрациями 15 из 28 изученных химических элементов характеризуется накипь артезианских вод среди неогеновых песчано-глинистых отложений Чуйской впадины (табл. 3). Обращает на себя внимание высокое содержание в накипи из вод впадины Au, Th, U, As,

Ba, Sr, что предположительно указывает на их сорбированное нахождение среди углеродистых пород этих отложений.

Менее интенсивно проявленные максимумы содержания элементов в накипи подземных вод связаны с полями развития вулканитов венд-кембрийского и ниже-среднедевонского возраста, отвечающих основным этапам тектоно-магматической активности региона. Так, для накипи водовмещающих толщ мафических вулканитов венд-кембрия характерны максимальные концентрации сидерофильных элементов (Fe, Cr, Co). Напротив, для накипи вод салических вулканитов девона более характерны литохалькофильные, редкоземельные и радиоактивные элементы (Zn, Ba, Sr, U и др.).

Примечательно, что уровни присутствия элементов в накипи вод четвертичных отложений и пород складчатого фундамента в целом близки, что объясняется незначительной мощностью рыхлого чехла и его присутствием в отрицательных морфоструктурах, в зоне активного водообмена с водами фундамента.

К особенностям взаимосвязей элементов в накипи питьевых вод РА относится (табл. 4):

- отсутствие корреляционных связей кальция с другими химическими элементами (кроме железа), указывающее на его «независимое» от

Таблица 2. Среднее содержание элементов в накипи вод водовмещающих пород (г/т)*

Породы	Ca	Na	Fe	Cr	Co	Zn	As	Sb	Ba	Sr	Br	La	Ce	Nd	Sm	Yb	Au	Th	U
ПГС	25,1	0,012	0,13	10,4	10,7	2705	1,3	0,15	150	1488	7,0	0,27	0,86	3,6	0,07	0,04	0,004	0,07	8,7
Глины	22,0	0,038	0,71	5,1	5,9	898	76,1	0,58	861	3037	5,1	1,10	1,12	10,2	0,34	0,06	0,018	0,33	30,5
Песчаники	26,4	0,020	0,08	5,9	1,3	890	2,4	1,09	108	1519	6,8	0,31	0,80	4,0	0,11	0,03	0,003	0,09	10,8
Порфиры, туфы	26,6	0,014	0,03	1,7	2,1	2335	0,9	0,16	86	2782	5,8	0,12	0,54	3,4	0,04	0,02	0,001	0,05	10,3
Порфириты	27,4	0,070	0,09	7,0	7,2	3044	1,5	0,15	98	1301	12,1	0,36	0,54	4,2	0,09	0,06	0,001	0,12	7,7
Известняки	25,1	0,024	3,77	163,5	53,2	1626	1,9	0,59	100	1040	9,5	0,44	1,06	2,5	0,10	0,06	0,005	0,14	6,6
Метасланцы	25,5	0,008	1,35	5,4	20,0	2349	4,1	0,24	128	1198	9,4	0,30	0,72	4,2	0,10	0,04	0,004	0,09	11,5

* – содержание кальция, натрия и железа в вес. %; выделено максимальное содержание элементов.

Таблица 3. Среднее содержание элементов в солевых отложениях подземных вод (г/т)*

Толщи	Ca	Na	Fe	Cr	Co	Zn	As	Sb	Ba	Sr	Br	La	Ce	Nd	Sm	Yb	Au	Th	U
Q _{III-IV}	26,5	0,009	1,64	13,2	35,2	2908	2,2	0,44	148	1442	7,1	0,32	0,94	3,5	0,07	0,05	0,004	0,11	8,7
N	22,5	0,038	0,71	5,1	5,9	899	76,1	0,58	861	3037	5,1	1,10	1,12	10,2	0,34	0,06	0,018	0,33	30,5
D	26,6	0,025	0,05	3,9	2,5	2567	0,9	0,10	104	2030	8,0	0,25	0,57	4,2	0,07	0,03	0,002	0,06	12,5
Є ₂ -S	27,4	0,020	0,09	6,8	1,4	1867	2,3	1,09	119	1650	7,2	0,38	1,00	4,1	0,14	0,04	0,004	0,11	9,6
V-Є ₁	26,0	0,018	2,63	26,3	37,9	2529	1,5	0,34	85	942	9,0	0,34	0,73	3,1	0,09	0,05	0,003	0,11	7,1

* – содержание кальция, натрия и железа в вес. %; выделено максимальное содержание элементов.

Таблица 4. Связи химических элементов в солевых отложениях подземных вод РА

Na	Ca	Cr	Fe	Co	Zn	As	Br	Sr	Sb	Ba	La	Ce	Nd	Sm	Yb	Au	Th	U	
1,00	-0,18	0,08	0,23	0,22	-0,11	0,06	0,36	0,11	0,22	0,05	0,46	0,20	0,22	0,31	0,33	0,07	0,53	0,24	Na
	1,00	-0,02	±0,34	-0,32	0,04	-0,20	-0,21	0,24	-0,03	-0,11	-0,19	-0,11	0,17	0,01	-0,25	-0,13	-0,23	0,03	Ca
		1,00	0,21	0,20	-0,02	-0,04	0,24	-0,02	0,09	0,02	0,04	0,12	-0,11	-0,12	0,23	0,16	0,04	-0,09	Cr
			1,00	0,98	-0,02	0,05	0,18	-0,16	0,19	-0,06	0,26	0,18	-0,27	-0,14	0,69	0,06	0,47	-0,13	Fe
				1,00	0,06	0,02	0,19	-0,19	0,20	-0,08	0,30	0,22	-0,29	-0,13	0,73	0,06	0,48	-0,14	Co
					1,00	-0,07	0,22	-0,07	-0,01	-0,21	0,33	0,01	-0,15	0,09	0,36	0,00	0,13	-0,19	Zn
						1,00	0,01	-0,05	0,06	0,83	-0,04	-0,12	0,07	0,40	-0,06	0,75	-0,04	0,02	As
							1,00	-0,17	-0,01	-0,03	0,11	0,06	0,07	0,06	0,16	-0,02	0,15	0,13	Br
								1,00	-0,09	0,23	0,21	0,05	0,62	0,40	-0,11	-0,02	0,13	0,63	Sr
									1,00	0,00	0,13	0,09	-0,04	0,06	0,25	0,38	0,27	-0,03	Sb
										1,00	0,09	0,14	0,40	0,46	-0,14	0,71	0,03	0,32	Ba
											1,00	0,57	0,36	0,54	0,70	0,14	0,89	0,38	La
												1,00	0,17	0,36	0,38	0,09	0,56	0,07	Ce
													1,00	0,53	-0,13	0,18	0,25	0,90	Nd
														1,00	0,15	0,47	0,37	0,46	Sm
															1,00	0,08	0,76	-0,06	Yb
																1,00	0,08	0,13	Au
																	1,00	0,30	Th
																		1,00	U

Примечание: выделены значимые корреляционные связи элементов: курсивом на уровне вероятности 95 % жирным шрифтом на уровне 99 %

них поступление в накипь из солевого состава вод;

- отрицательная значимая связь кальция и железа, свидетельствующая о разных минеральных формах их нахождения в накипи (карбонаты и гидрооксиды соответственно);
- практически прямая зависимость содержания железа и кобальта, предположительно указывающая на сорбцию последнего гидроокислами железа;
- тесные связи золота с мышьяком, сурьмой и барием, характерные для золотооруденения региона.

Сравнение диапазонов содержания и средних концентраций элементов в накипи подземных питьевых вод Республики Алтай, Томской области [8] и Байкальского региона [9] говорит об их близком между собой химическом составе (рис. 3). В то же время в накипи вод РА по сравнению с соевыми отложениями Томской области вариабельность и среднее содержание большинства элементов в целом ниже, кроме цинка, мышьяка, брома, стронция, хрома, урана. Отличительной чертой химического состава накипи подземных вод РА является также более высокий (в среднем в 5 раз) уровень присутствия урана при равенстве среднего содержания тория (0,1 г/т), а также на 1,5–2 порядка более низкие концентрации золота (среднее 0,004 против 0,1 г/т для накипи Томской области, а максимальное 0,03 против 27 г/т).

В накипи подземных питьевых вод Байкальского региона относительно охарактеризованных субъектов проявлено аномально высокое присутствие натрия (в среднем 1 %), мышьяка (380 г/т) и весьма низкое среднее содержание цинка (32 г/т).

Предварительно рассчитанные отношения среднего содержания химических элементов в подземных питьевых водах РА и в их солевых отложениях говорят о разной степени их накопления в накипи. Так,

средний уровень накопления хрома в накипи составляет 1500 раз, кальция и бария – 4000, урана – 6500, железа и кобальта – 25000, цинка – 100000 раз.

Для более детально изученной накипи подземных питьевых вод Байкальского региона [9], полученной путем выпаривания воды, коэффициенты накопления химических элементов варьируются в очень больших пределах – от единиц (никель) до сотен тысяч (Co, As, Ti, Cr, P, Ge, Ga). Большинство элементов накипи имеют коэффициенты накопления от 1000 до 30000 (рис. 4).

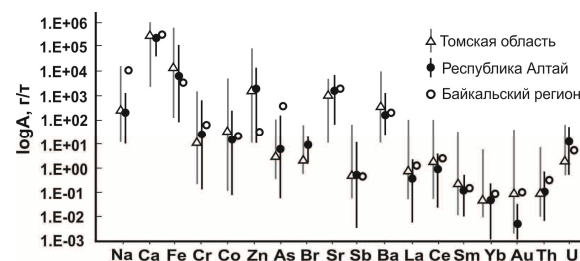


Рис. 3. Разброс и среднее содержание элементов в накипи подземных питьевых вод Республики Алтай, Томской области и Байкальского региона

Имеющиеся данные позволяют считать, что накопление химических элементов в накипи различных по геологическому строению регионов имеет свои индивидуальные особенности. Для их сравнительной характеристики предлагается использовать геохимический ряд коэффициентов накопления (К_н) основных элементов накипи. К числу последних следует отнести кальций, карбонат которого является матрицей накипи, а также находящиеся с ним в «противофазе» железо и алюминий, присутствующие преимущественно в виде оксидов и гидрооксидов [4]. К второстепенным, но характерным элементам накипи относится геохимически близкий к кальцию стронций, предположительно присутствующий в форме стронцианита, а

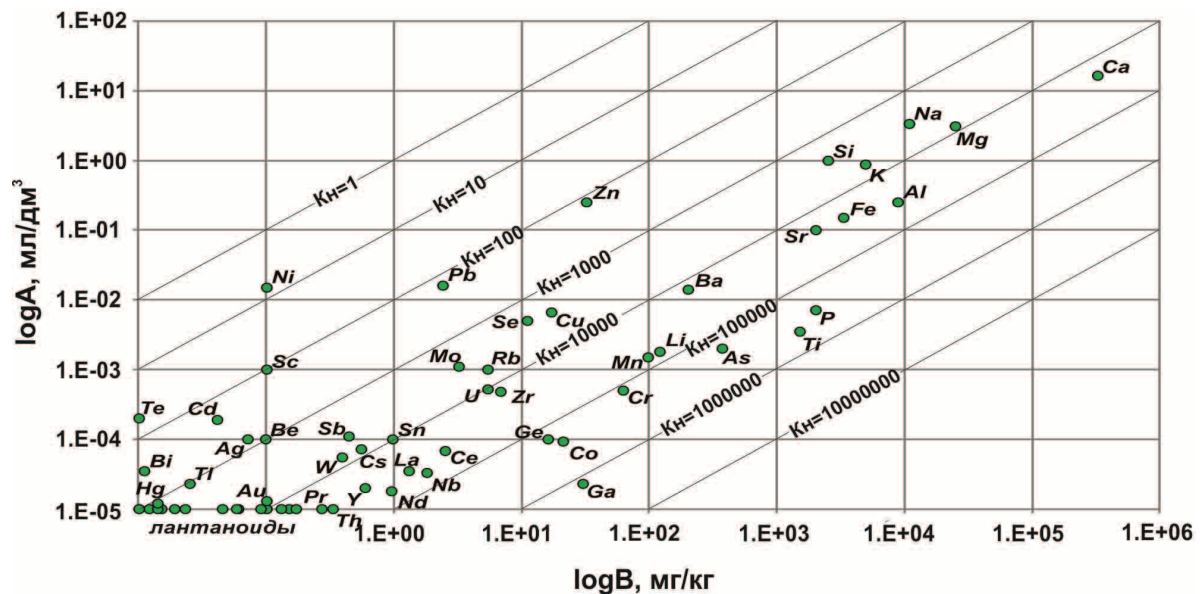


Рис. 4. Уровни накопления химических элементов в накипи подземных питьевых вод РА: А – содержание химического элемента в воде, мг/дм³; В – содержание химического элемента в солевых отложениях, мг/кг

также барий и цинк, содержание которых достигает первых процентов от массы накипи.

Предлагаемая усредненная геохимическая формула накипи питьевых вод на примере Байкальского региона будет иметь следующий вид:

$\text{Ca}18000\text{--Al}36000\text{--Fe}24500\text{--Sr}21400\text{--Ba}18500\text{--Zn}110$.

Для накипи питьевых вод Республики Алтай предварительно рассчитанная формула имеет вид:

$\text{Ca}4000\text{--Al (нет данных)--Fe}25000\text{--Sr}22000\text{--Ba}4000\text{--Zn}11000$.

Сравнение этих формул говорит как об их близости, так и о некотором отличии, обусловленном главным образом различием содержания химических элементов в природной воде. Возможны варианты с расширенным перечнем элементов, но следует иметь в виду, что для элементов с низким уровнем присутствия различия их коэффициентов накопления будут еще более значительными.

Выводы

Максимальные уровни присутствия большинства химических элементов в накипи проявлены для водоносных горизонтов среди углефицированных песчано-глинистых отложений чехла Чуйской межгорной впадины с признаками сорбционного накопления элементов.

Элементный состав солевых отложений (накипи) в целом согласуется с химическим составом подземных вод, используемых в питьевых целях, которые, в свою очередь, наследуют основные черты вещественного состава водовмещающих пород.

Показатели накопления элементов в накипи могут быть использованы для уточнения геохимической специализации водовмещающих образований, а ее химический состав – как индикатор качества питьевых вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрогеология СССР. Т. XVII. Кемеровская область и Алтайский край. – М.: Недра, 1972. – 606 с.
2. Кац В.Е. Хозяйственно-питьевые воды Республики Алтай и проблемы их изучения // Геоэкология Алтае-Саянской горной страны. – 2004. – № 1. – С. 123–125.
3. Кац В.Е., Фалалеев Ю.А. Особенности состояния подземных вод в Республике Алтай // Природные ресурсы Горного Алтая. – 2006. – № 1. – С. 75–80.
4. Язиков Е.Г., Рихванов Л.П., Барановская Н.В. Индикаторная роль солевых образований в воде при геохимическом мониторинге // Известия вузов. Геология и разведка. – 2004. – № 1. – С. 67–69.
5. Язиков Е.Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2006. – 47 с.
6. Evaluation of drinking water according to geochemical composition of its salt deposition / L.P. Rikhvanov, N.V. Baranovskaya, B.R. Soktoev, T.A. Mongolina // Proceedings of 8th International Conference «Environmental Engineering». – Vilnius, Lithuania, May 19–20, 2011. – P. 337–342.
7. Способ определения участков загрязнения ураном окружающей среды: пат. 2298212 Рос. Федерация. № 2005120840; заявл. 04.07.05; опубл. 27.04.07, Бюл. № 12. – 6 с.
8. Монголина Т.А. Геохимические особенности солевых отложений (накипи) питьевых вод как индикатора природно-техногенного состояния территории: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2011. – 21 с.
9. Соктоев Б.Р., Рихванов Л.П., Тайсаев Т.Т. Геохимические особенности солевых отложений питьевых вод Байкальского региона // Современные проблемы геохимии: Матер. Всеросс. совещ. – Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2012. – Т. 1. – 241–244.

Поступила 01.10.2013 г.

FEATURES OF CHEMICAL COMPOSITION OF SALT DEPOSITS IN UNDERGROUND DRINKING WATER OF ALTAI REPUBLIC

Yury V. Robertus,

Cand. Sc., Institute for water and environmental problems of SB RAS
Russia, 656038, Altai Territory, Barnaul, Molodezhnaya atreet, 1.
E-mail: ariecol@mail.gornyy.ru

Leonid P. Rikhvanov,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: rikhvanov@tpu.ru

Bulat R. Soktoev,

Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30.
E-mail: bulatsoktoev@gmail.com

The urgency of the discussed issue is conditioned by the possibility of applying drinking water limescale as an indicator of features of water-bearing rocks and quality of water.

The main aim of the study is to investigate the features of chemical elements accumulation (heavy metals, rare, rare-earth and radio-active elements) in salt deposits, formed at water boiling on the territory of Altai Republic.

The methods used in the study: Them main method of element composition analysis was instrumental neutron activation analysis.

The results: The authors have stated the regional specific features of limescale in settlements of Altai Republic. Distribution of chemical elements depends on lithological composition of water-bearing rocks: maximum concentrations of chalcophile and lithophile elements are associated with clay sediments; Na, Zn, Br – with basaltic and andesite-basaltic porphyrites; Fe, Cr, Co – with carbonate facies. The geochemical specialization of underground water limescale appears also in water-bearing geologic formations of different age. It was shown that element composition of salt deposits correlates with chemical composition of underground water used in drinking water-supply. The authors make the conclusion that indicators of elements accumulation in limescale can be used for correcting geochemical features of water-bearing rocks and its chemical composition – as an indicator of drinking water quality.

Key words:

Altai Republic, underground drinking water, scale, particularly the chemical composition.

REFERENCES

1. *Gidrogeologiya SSSR. Kemerovskaya oblast i Altayskiy kray* [Hydrogeology of the USSR. Kemerovo region and Altai Territory]. Moscow, Nedra, 1972. Vol. XVII. 606 p.
2. Kats V.E. Hozyaystvenno-pitevye vody Respubliki Altai i problemy ikh izucheniya [Drinking water of the Republic of Altai and the problems in its research]. *Geokologiya Altae-Sayanskoy gornoy strany*, 2004, no. 1, pp. 123–125.
3. Kats V.E., Falaleev Yu.A. Osobennosti sostoyaniya podzemnykh vod v Respublike Altai [Features of underground water state in the Republic of Altai]. *Prirodnye resursy Gornogo Altaya*, 2006, no. 1, pp. 75–80.
4. Yazikov E.G., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V. Indikatornaya rol solevykh obrazovaniy v vode pri geokhimicheskom monitoring [Indicating role of salt formations in water at geochemical monitoring]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 2004, no. 1, pp. 67–69.
5. Yazikov E.G. *Ekogeokhimiya urbanizirovannykh territoriy yuga Zapadnoy Sibiri. Avtoreferat dis. dokt. nauk* [Ecological geochemistry of urbanized territories in the south of Western Siberia. Dr. Diss.]. Tomsk, 2006. 47 p.
6. Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Soktoev B.R., Mongolina T.A. Evaluation of drinking water according to geochemical composition of its salt deposition. *Proceedings of 8th International Conference «Environmental Engineering»*. Vilnius, Lithuania, May 19–20, 2011. pp. 337–342.
7. *Sposob opredeleniya uchastkov zagryazneniya uranom okruzhayushchey sredy* [The method for determining environmental uranium contamination areas]. Patent RF, no. 2005120840, 2007.
8. Mongolina T.A. *Geokhimicheskie osobennosti solevykh otlozheniy (nakipi) pitevykh vod kak indikatora prirodno-tekhnogenogo sostoyaniya territorii. Avtoreferat dis. kand. nauk* [Geochemical characteristics of salt sediments (scale) of drinking water as an indicator of natural technogenic state of the territory]. Tomsk, 2011. 21 p.
9. Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Taysaev T.T. Geokhimicheskie osobennosti solevykh otlozheniy pitevykh vod Baykalskogo regiona [Geochemical features of salt sediments in drinking waters of Baykal region]. *Sovremennye problemy geokhimii. Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya* [Current problems of geochemistry. Proc. All-Russian meeting]. Irkutsk, IG SO RAN Publ., 2012. Vol. 1, pp. 241–244.

УДК 502.568: 577.4

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТЕПНЫХ ЛАНДШАФТОВ В РАЙОНАХ НЕФТЕГАЗОДОБЫЧИ (НА ПРИМЕРЕ ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ)

Мячина Ксения Викторовна,

канд. геогр. наук, научн. сотр. лаборатории ландшафтного разнообразия
и заповедного дела Института степи Уральского отделения РАН,
Россия, 460000, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11. E-mail: mavicsen@list.ru

Токарева Ольга Сергеевна,

канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники Института
кибернетики ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: ostokareva@gmail.com

Изучение трансформации ландшафтов, находящихся в условиях техногенного воздействия, является важным для обеспечения устойчивого развития территорий. Рассмотрены методические вопросы оценки трансформации ландшафтов в районах воздействия нефтегазодобывающего комплекса. Использован метод балльных оценок и метод многомерных средних. Представлены результаты геоэкологического анализа трансформации ландшафтов в районах нефтегазодобычи степной зоны Оренбургской области на основе двенадцати показателей, определяющих величину техногенной нагрузки на ландшафтные комплексы. Исследована возможность использования космических снимков среднего пространственного разрешения для оценки показателей трансформации ландшафтов. Показано, что на территории, значительная часть которой используется в сельском хозяйстве, в большинстве случаев представляется возможным определить наличие объектов в границах нефтяных и газовых месторождений, однако является затруднительным с достаточной степенью точности оценить плотность скважин и количество узловых сооружений нефтепромыслов.

Ключевые слова:

Нефтегазодобыча, трансформация ландшафтов, показатели, статистические методы, объекты инфраструктуры, космический снимок, дешифрирование, Оренбургская область.

Введение

Оренбургская область является одним из основных регионов нефтегазодобычи в России, входящим в состав Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. В ландшафтах нефтяного недропользования сформированы особые типы экологических систем, природные компоненты которых подвергаются интенсивным техногенным нагрузкам и приобретают новый комплекс свойств и режимов, влияющих на их способность к эффективному выполнению экологических функций. Оренбургская область, в числе других нефтегазодобывающих регионов, характеризуется преимущественно негативными последствиями нефтегазодобычи. Территория нефтегазоносной части области составляет около 90 тыс. км², средняя плотность размещения добывающих скважин – 4,75 шт./100 км², количество нефтегазопромысловых узловых сооружений подготовки сырья – около 70 [1].

Изучение уровней и вариантов трансформации природных комплексов в районах с развитой инфраструктурой нефтегазового недропользования является необходимым условием в решении экологических проблем нефтегазоносных регионов, так как:

- соотношение площадей естественных ландшафтов с площадями природно-техногенных комплексов определяет возможности дальнейшего устойчивого развития территорий;
- недостаточная информация о происходящих в ландшафтах изменениях может явиться причиной экологического кризиса.

Целью данной работы является геоэкологическая оценка степных ландшафтов в нефтегазопромысловых районах Оренбургской области. Полученные результаты могут способствовать разработке рекомендаций по оптимизации недропользования на исследуемой территории, предотвращению возможных негативных последствий и обеспечению экологической безопасности региона.

Ландшафты регионов нефтегазодобычи относятся к территориям, нуждающимся в систематическом мониторинге экологического состояния. В настоящее время, наряду с традиционными наземными методами наблюдения за состоянием ландшафтов, подвергающихся постоянным интенсивным техногенным нагрузкам, все чаще используется космический мониторинг. Преимуществами дистанционного изучения ландшафтов на основе космических снимков (КС) являются масштабность исследований, возможность получения в процессе их дешифрирования архивной или оперативной информации о состоянии природных объектов. Как показано, например в [2], использование данных космической съемки на территориях с однородным растительным покровом, отличающимся низкой степенью устойчивости, позволяет распознать нарушенные территории с достаточной степенью точности. Представляет интерес оценить возможность использования КС для оценки показателей, определяющих величину техногенной нагрузки в нефтегазодобывающих районах степной зоны, где большая доля земель используется в сельском хозяйстве.

Методические вопросы геоэкологического анализа территорий

Геоэкологический анализ степных ландшафтов нефтегазовых районов Оренбургской области проведен на основе оценки двенадцати диагностических показателей, определяющих величину техногенной нагрузки на территории нефтегазодобычи и, соответственно, уровень возможной трансформации ландшафтов. Выбор используемых показателей, перечень которых приведен в табл. 1, обоснован в ряде более ранних работ [1, 3].

Для анализа их совокупного влияния на состояние ландшафтов использован метод балльных оценок, широко применяемый в геоэкологии. Популярность указанного метода обусловлена возможностью приведения значений показателей к безразмерному виду, что решает проблему разной размерности величин. Исследуемые объекты сравниваются между собой по общей сумме баллов всех показателей: чем меньше разница баллов, тем ближе объекты, и, наоборот, чем больше разница, тем в большей степени они различаются. Балльные оценки показателей находят путем их шкалирования либо расчетом по формулам, но могут и непосредственно присваиваться показателям, формирующим систему [4]. В данной работе балльные оценки присваивались непосредственно показателям и шкалировались (табл. 1), после чего вычислялись общие суммы баллов.

В зависимости от общей балльной оценки, полученной по двенадцати показателям, предлагается выделять 6 уровней трансформации ландшафтов: незначительный (0–10 баллов), слабый (10–30 баллов), средний (30–50 баллов), умеренно-сильный (50–70 баллов), сильный (70–90 баллов), максимальный (90–110 баллов).

Далее для обработки полученных данных применен статистический метод группировок – метод многомерных средних. Метод группировок [5] позволяет выявить закономерности изменения основных показателей в рассматриваемой совокупности нефтегазовых районов области, установить взаимосвязи и зависимости различных сторон оказываемого воздействия и определить влияние факторов на изменение результативного признака. В нашем случае метод многомерных средних дает возможность проследить зависимость уровней техногенной трансформации ландшафтов нефтегазодобывающих территорий от той или иной группы факторов и выявить те показатели модификации, которые оказывают наиболее существенное влияние в каждом конкретном районе.

Целью группировки является разбиение совокупности районов на качественно однородные группы по большому числу признаков одновременно и определения на их основе связи и влияния факторных признаков на результативный. В качестве факторных признаков в данной работе использованы показатели, определяющие величину техногенной нагрузки в районах нефтегазодобычи, приведенные в табл. 1. Общая балльная оценка использована в качестве результативного признака.

Таблица 1. Балльная оценка показателей техногенной нагрузки в районах нефтегазодобычи

	Показатель	Количественная характеристика показателя и соответствующее ей количество баллов
1	Количество месторождений нефти и газа (действующих, законсервированных, разработанных)	1–5 – 16 21–25 – 56 41–45 – 96 6–10 – 26 26–30 – 66 46–50 – 106 11–15 – 36 31–35 – 76 51–55 – 116 16–20 – 46 36–40 – 86
2	Плотность скважин (кол-во/100 км ²)	< 1 – 16 > 5–10 – 36 > 16–20 – 56 1–5 – 26 > 10–15 – 46 > 20–25 – 66
3	Количество узловых сооружений нефтепромыслов	1–3 – 16 4–6 – 26 7–9 – 36
4	Наличие и количество месторождений с различными сроками разработки	1 месторождение, введенное в разработку до 1952 г. – 36 в период 1952–1975 гг. – 26 после 1975 г. – 16
5	Наличие и количество месторождений разной размерности (по величине запасов сырья)	1 среднее м-ние (10–30 млн т) – 16 1 крупное м-ние (> 30 млн т) – 26
6	Количество крупных аварий на объектах нефтегазодобычи	1–3 – 16 7–9 – 36 4–6 – 26 10–12 – 46
7	Наличие и количество памятников природы и особо охраняемых природных территорий, находящихся в зоне влияния нефтепромыслов	1–3 – 16 10–12 – 46 4–6 – 26 13–15 – 56 7–9 – 36 16–18 – 66
8	Доля земель от общей площади района, отведенных под объекты нефтегазодобычи	0–1 % – 16 >20–30 % – 46 >1–10 % – 26 >30–40 % – 56 >10–20 % – 36
9	Наличие и количество месторождений с тяжелой нефтью ($\rho > 0,89$ г/см ³)	1–2 – 16 3–4 – 26 5–6 – 36
10	Наличие и количество месторождений с высоким содержанием сероводорода в попутном нефтяном газе ($H_2S > 3$ %)	1–2 – 16 3–4 – 26 5–6 – 36
11	Наличие и количество месторождений со скважинами, находящимися в долгосрочной консервации (более 20 лет)	1–2 – 16 3–4 – 26 5–6 – 36
12	Наличие и количество месторождений с различными объемами накопленной добычи углеводородного сырья (тыс. т/км ²)	Месторождение с объемом добычи < 100 – 16 > 500–1000 – 36 100–500 – 26 > 1000–1500 – 46

Многомерная группировка построена на основе принципа перехода от величин с определенной размерностью (*i*) к относительным безразмерным величинам (*ij*).

Все значения факторных признаков X_i заменяются отношениями:

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}}{\bar{X}_j}, \quad (1)$$

где $\bar{X}_j$ – средний уровень j -го факторного признака.

С использованием безразмерных величин факторных признаков P_{ij} определяется многомерная средняя:

$$\bar{P}_{ij} = \frac{\sum P_{ij}}{k}, \quad (2)$$

где k – число факторных признаков.

Из анализируемых факторных признаков, близких между собой по характеру воздействия, формируются группы – обобщенные факторы, при этом значимость влияния групп на результативный фактор предполагается одинаковой.

На основе относительных величин факторных признаков, составляющих обобщенный фактор (группу), определяются факторные многомерные средние для каждой группы.

Ширина равного интервала для построения групп на основе многомерной средней определяется по формуле:

$$h = \frac{\bar{P}_{\max} - \bar{P}_{\min}}{n}, \quad (3)$$

где n – число групп.

Результаты и обсуждение

В качестве классификационных единиц для оценки уровня трансформации ландшафтов в результате деятельности нефтегазодобывающего комплекса использованы административные районы Оренбургской области.

Результаты классификации районов Оренбургской области по уровню техногенной трансформации ландшафтов, полученные на основе описанного выше метода балльных оценок, приведены на рис. 1. Как видно из рисунка, максимальным уровнем трансформации ландшафтов характеризуются Курманаевский и Оренбургский районы области.

Далее был применен метод многомерных средних, где в качестве факторных признаков модификации ландшафтов использованы двенадцать показателей, приведенных в табл. 1. Общая балльная оценка использовалась как результативный признак. По каждому показателю производились: двухфакторный анализ (наличие/отсутствие признака), количественный анализ, качественный анализ.

Из исходных факторных признаков, близких между собой по характеру воздействия, были сформированы группы (обобщенные факторы) следующим образом:

а) «Количественная характеристика нефтегазопромысловых объектов» включает следующие

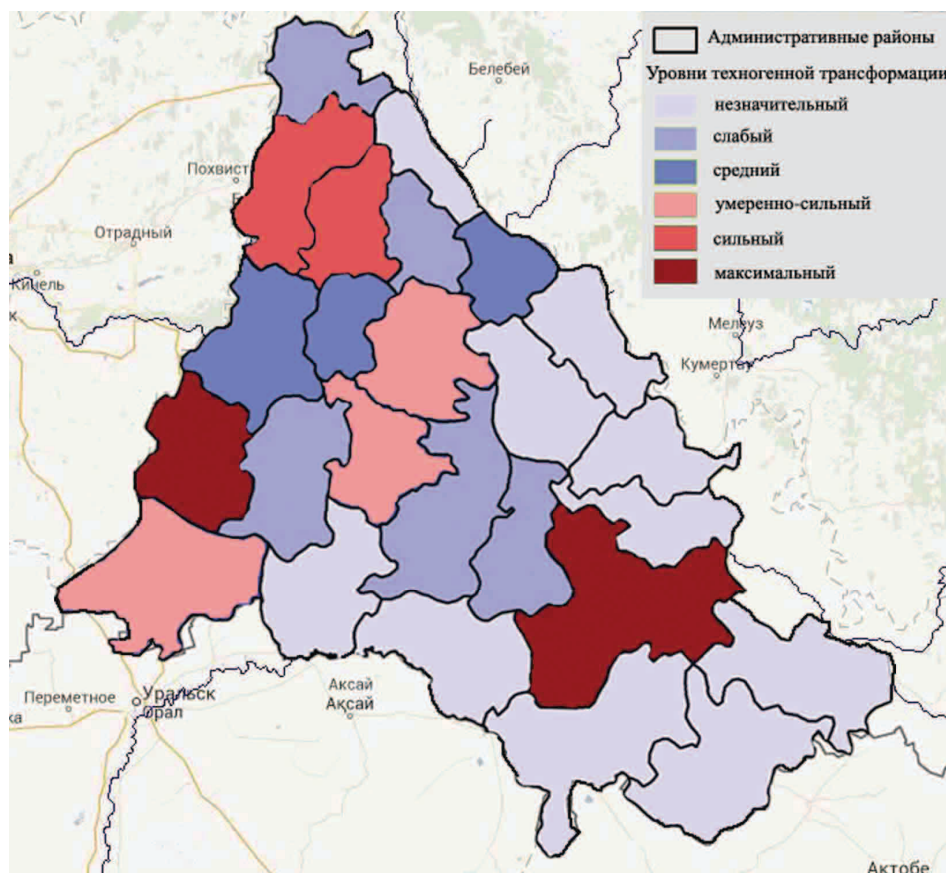


Рис. 1. Классификация районов Оренбургской области по уровню техногенной трансформации ландшафтов на основе метода балльных оценок

- показатели: количество месторождений нефти и газа (действующих, законсервированных, выработанных), плотность пробуренных скважин (кол-во/100 км²), количество узловых сооружений нефтепромыслов;
- б) «Качественная характеристика месторождений» включает показатели: наличие месторождений с различными сроками разработки, наличие месторождений разной размерности (по величине запасов сырья), наличие месторождений с различными объемами накопленной добычи (тыс. т/км²);
- в) «Характеристика непосредственных нарушений в ландшафтах» включает показатели: количество крупных аварий на объектах нефтегазодобычи за одинаковый период времени, доля земель от общей площади района, отведенных под объекты нефтегазодобычи, наличие памятников природы и особо охраняемых природных территорий, находящихся в зоне влияния нефтепромыслов;
- г) «Характеристика степени возможных опасностей» включает показатели: наличие и количество месторождений с тяжелой нефтью ($\rho > 0,89$ г/см³), наличие и количество месторождений с высоким содержанием сероводорода в попутном нефтяном газе ($H_2S > 3\%$), наличие и количество месторождений со скважинами, находящимися в долгосрочной консервации (более 20 лет).

На основе формул (1, 2) определены относительные величины факторных признаков, составляющих группу, и факторные многомерные средние для каждой группы. Интервалы по многомерной средней, рассчитанные с использованием формулы (3), имеют следующий вид:

- до 0,603 включительно (районы со слабым уровнем трансформации);
- от 0,603 до 1,033 включительно (районы со средним уровнем трансформации);
- от 1,033 до 1,463 включительно (районы с сильным уровнем трансформации);
- от 1,463 и более (районы с очень сильным уровнем трансформации).

Результаты многомерной группировки нефтегазодобывающих районов Оренбургской области представлены в табл. 2.

Так, очень сильный уровень техногенной трансформации ландшафтов, связанной с количеством объектов, прослеживается на территории 6-ти районов (Курманаевского, Асекеевского, Бугурусланского, Бузулукского, Красногвардейского, Сорочинского). Очень сильный уровень техногенной трансформации, связанной с качественной характеристикой объектов, отмечается на территории 5-ти районов (Асекеевского, Бугурусланского, Курманаевского, Красногвардейского, Сорочинского). Очень сильный уровень техногенной трансформации, связанной с непосредственными нарушениями в ландшафтах, наблюдается на территории 3-х районов (Асекеевского, Бугурусланского, Курманаевского). Очень сильный уровень техногенной трансформации, связанный с характеристикой возможных опасностей, в районах области отсутствует.

На основе анализа данных, приведенных в табл. 2, можно сделать вывод, что наибольший вклад в преобразование природных комплексов вносят показатели количественных характеристик, наименьший – показатели характеристик степени возможных опасностей.

Одной из наиболее сложных задач при геоэкологическом анализе природно-техногенных комплексов является выявление реального количества ландшафтов, измененных и нарушенных в процессе внедрения объектов инфраструктуры, в нашем случае – объектов инфраструктуры нефтегазовых промыслов.

Далее выполнена оценка возможности использования космических снимков среднего пространственного разрешения со спутников Landsat для оценки показателей, определяющих величину техногенной нагрузки в нефтегазодобывающих районах. КС со спутников Landsat широко применяются в решении природно-ресурсных задач и распространяются на безвозмездной основе.

В качестве ключевого участка была выбрана территория в границах Бобровского нефтяного месторождения, расположенного на границе Бузулукского и Курманаевского административных районов. Бобровское месторождение находится в разработке более 40 лет, является одним из самых крупных нефтяных месторождений в области, за-

Таблица 2. Результаты многомерной группировки нефтегазодобывающих районов Оренбургской области

Группы районов по многомерной средней	ЧР	ОБТТ	Обобщённые факторы (группы)							
			Количественная характеристика объектов		Качественная характеристика месторождений		Характеристика непосредственных нарушений в ландшафтах		Характеристика степени возможных опасностей	
			ЧР	ОБТТ	ЧР	ОБТТ	ЧР	ОБТТ	ЧР	ОБТТ
до 0,603 включительно	11	11,272	12	10,750	13	12,077	12	11,750	15	21,267
от 0,603 до 1,033 включительно	7	30,714	2	29,000	5	34,600	6	36,833	7	47,143
от 1,033 до 1,463 включительно	5	59,000	4	35,750	1	53,000	3	42,667	2	40,500
1,463 и более	1	96,000	6	66,667	5	69,400	3	80,000	0	0

ЧР – число районов;

ОБТТ – общий балл техногенной трансформации.

нимает площадь более 100 км² и обладает инфраструктурой высокой плотности: более 250 скважин, наличие узловых сооружений и трубопроводов, многочисленные полевые дороги, соединяющие объекты месторождения. Ландшафты Бобровского месторождения характеризуются внушительным объемом техногенного вмешательства, способствующего значительной трансформации ландшафтов.

Выбор территории Бобровского месторождения обусловлен также тем, что оно расположено на территории типичной степной зоны, что предполагает возможность интерполяции полученных результатов на другие месторождения Оренбургской области, которые также расположены преимущественно в степной зоне. Рельеф месторождения представляет собой холмистую равнину, частично расчлененную овражно-балочной сетью. При этом, как и почти по всей территории Оренбургской области, основным типом земель в границах полигона месторождения являются земли сельскохозяйственного назначения (70...80 %). Вегетационный период в районе исследования наступает, как правило, 20 апреля и заканчивается примерно к 10 октября [6].

Для определения объектов инфраструктуры нефтегазовых промыслов и земель, нарушенных в результате их функционирования, был обработан космический снимок со спутника Landsat-5 (сканер TM) с пространственным разрешением 30 м с датой съемки 13.06.2009 г. Для дешифрирования КС использован программный комплекс ERDAS Imagine, в частности, метод неконтролируемой классификации Isodata [7]. Наиболее приемлемые

результаты были получены при первоначальном разбиении пикселей выбранного КС на 70 классов, с дальнейшим выявлением и объединением классов, относящихся к классу «Инфраструктура». Основную часть объектов инфраструктуры месторождения составляют кустовые площадки добывающих скважин, а также площадки нагнетательных и законсервированных скважин, факельных установок, технологических объектов, цеха добычи нефти и газа и др. Кроме того, к классу «Инфраструктура» были отнесены дороги и коммуникации. Верификация результатов дешифрирования указанных объектов инфраструктуры Бобровского нефтяного месторождения, за исключением дорог и коммуникаций, производилась по векторному слою, содержащему 462 объекта (рис. 2), который был получен ручной оцифровкой данных космических снимков высокого пространственного разрешения, представленных в программе GoogleEarth.

На рис. 3 приведены результаты дешифрирования КС со спутника Landsat-5.

Точность распознавания объектов инфраструктуры Бобровского нефтяного месторождения с использованием метода неконтролируемой классификации Isodata составила 56 %. Такая низкая точность распознавания обусловлена тем, что часть пикселей, отображающих объекты инфраструктуры, попала в классы, которые также содержат значительное количество пикселей, относящихся к территориям, нарушенным в результате сельскохозяйственного освоения; т. е. указанные пиксели имеют практически идентичные спектральные яркости, что затрудняет применение методов классификации с обучением.

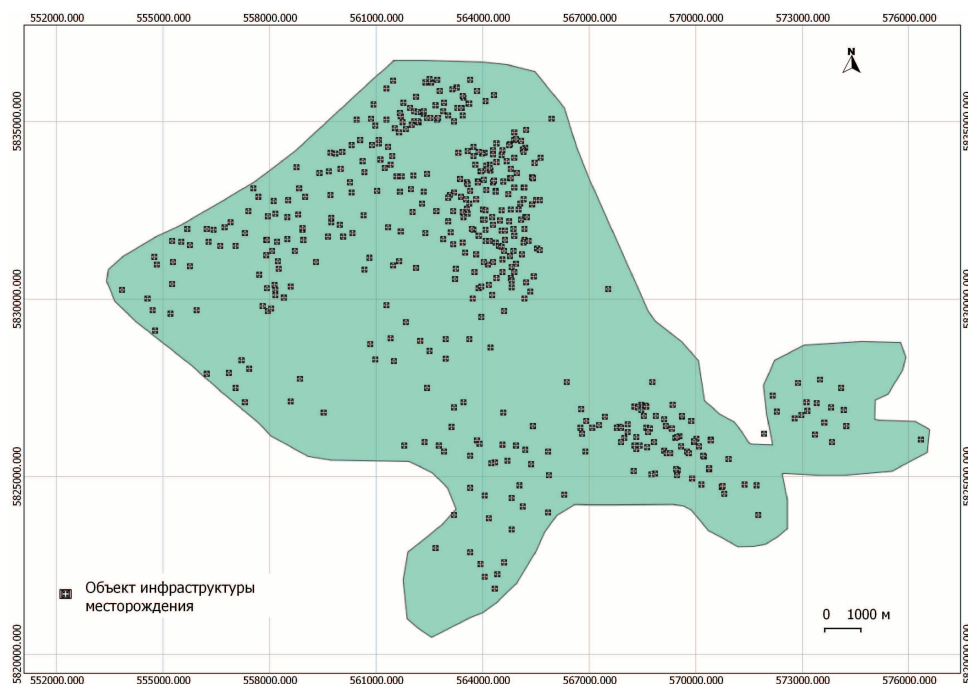


Рис. 2. Объекты инфраструктуры Бобровского нефтяного месторождения, идентифицированные в процессе ручной оцифровки данных Google Earth

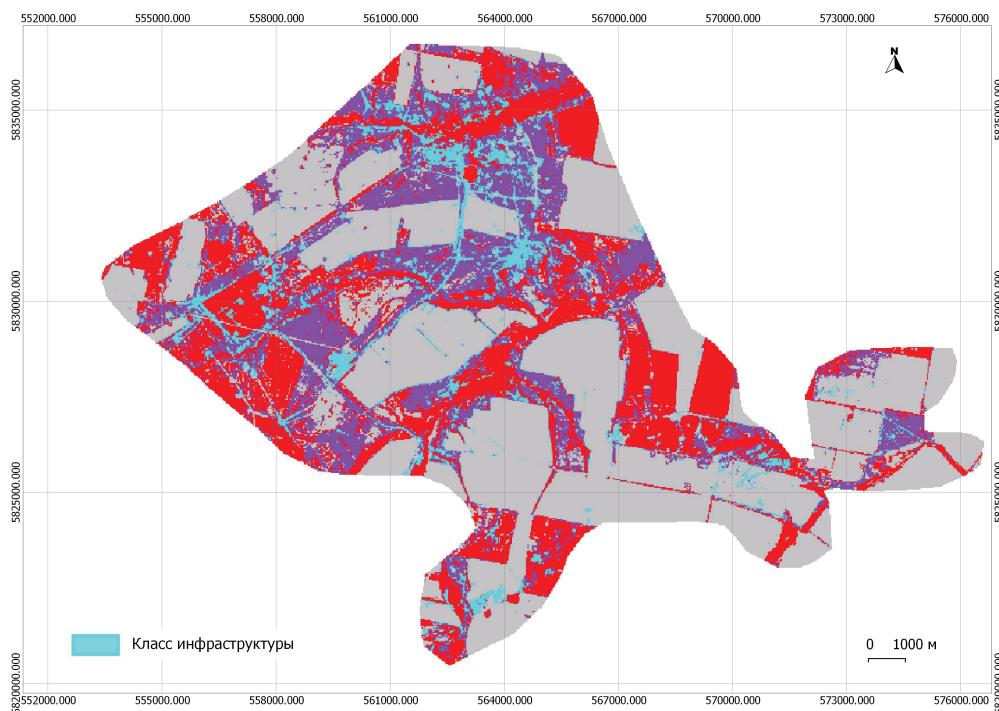


Рис. 3. Результаты классификации фрагмента космического снимка Landsat-5 территории Бобровского месторождения

Выводы

Традиционные геоэкологические методы, используемые в работе, позволяют дифференцировать территории нефтегазодобычи степной зоны Оренбургской области по уровням техногенной трансформации ландшафтов. Представленная классификация обнаруживает закономерности пространственного распределения техногенно-модифицированных ландшафтов и агломерации объектов нефтегазодобычи. Используемый в работе подход предполагает возможность введения новых или уточненных показателей и большую пространственную детализацию, а также позволяет на единой методической основе сравнивать уровни и варианты трансформации ландшафтных комплексов различных регионов нефтегазодобычи.

Обработка данных дистанционного зондирования Земли из космоса помогает проводить анализ

техногенных нарушений ландшафтов и контролировать текущую геоэкологическую ситуацию. Однако использование методов автоматической классификации снимков среднего пространственного разрешения практически не позволяет с достаточной точностью разделить ландшафты, нарушенные в результате двух видов природопользования: нефтегазового недропользования и сельскохозяйственного освоения.

Тем не менее, предлагаемый в работе двухаспектный подход даёт возможность сравнивать и анализировать воздействие на ландшафты в районах нефтегазодобычи и выявлять наиболее серьёзные показатели техногенного преобразования, что, в свою очередь, может способствовать разработке дальнейшей стратегии природопользования и рекомендаций по предотвращению негативных последствий и обеспечению экологической безопасности региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чибилёв А.А., Мячина К.В. Геоэкологические последствия нефтегазодобычи в Оренбургской области: научное издание. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 132 с.
2. Елсаков В.В., Щанов В.М. Дистанционный мониторинг разновременных нарушений растительного покрова в районах добычи и транспортировки нефти // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2004. – № 1. – С. 152–155.
3. Мячина К.В., Чибилёв А.А. Геоэкологические особенности нефтегазодобывающих районов Оренбургского Приуралья // Проблемы региональной экологии. – 2006. – № 4. – С. 11–20.
4. Коробов В.Б., Кочуров Б.И. Балльные классификации в геоэкологии: преимущества и недостатки // Проблемы региональной экологии. – 2007. – № 1. URL: http://www.ecoregion.ru/journal.php?num=18&stat=3&pstat=1&jrn=pre&jrs_page=1&pre_page=1&eut_page=1&tpe_page=1&lng=rus (дата обращения: 25.09.2013).
5. Шмойлова Р.А., Минашкин В.Г., Садовникова Н.А. и др. Теория статистики. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 656 с.
6. Чибилев А.А. Энциклопедия «Оренбуржье». Т. 1. Природа. – Калуга: Золотая аллея, 2000. – 192 с.
7. ERDAS Imagine v. 8.3. Field Guide. – Atlanta, 1997. – 656 p.

Поступила 26.09.2013 г.

UDC 502.568: 577.4

GEOECOLOGICAL ANALYSIS OF STEPPE LANDSCAPES IN OIL AND GAS PRODUCTION FIELDS (BY THE EXAMPLE OF ORENBURG REGION)

Kseniya V. Myachina,

Cand Sc., Institute of steppe Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
Russia, 460000, Orenburg, Pionerskaya street, 11. E-mail: mavicsen@list.ru.

Olga S. Tokareva,

Cand Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: ostokareva@gmail.com.

Study of anthropogenically affected landscape's transformation is essential to ensure the sustainable development of territories. The paper considers the methodical issues to evaluate the transformation of landscapes by oil and gas production complex. The authors have used the points-based assessment and method of multidimensional medium. The results of landscapes geoecological analysis in oil and gas production fields of the Orenburg region's steppe zone are introduced in the paper. The analysis was performed on the base of twelve indicators describing the amount of the technogeneous load. There is a possibility to use medium-resolution satellite imagery to evaluate the transformation of landscapes. It is possible to define the presence of manmade objects in the borders of the oil and gas fields in the territory mainly used for agricultural purposes. However, it is difficult to define the density of drills and the number of nodal structures of oil and gas fields using only satellite imagery within the agricultural territories.

Key words:

Oil and gas production, transformation of landscapes, indicators, statistical methods, objects of infrastructure, satellite image, interpretation, Orenburg region.

REFERENCES

1. Chibilev A.A., Myachina K.V. *Geoekologicheskie posledstviya neftegazodobychi v Orenburgskoy oblasti: nauchnoe izdanie* [Geoecological effect of oil and gas production in the Orenburg region: scientific publication]. Ekaterinburg, UrO RAN, 2007. 132 p.
2. Elsakov V.V., Shchanov V.M. Distancionnyy monitoring raznoyemennykh narusheniy rastitelnogo pokrova v rayonakh dobychi i transportirovki nefti [Remote monitoring of violations of vegetation happening at different times in areas of production and transportation of oil]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa – Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2004, no. 1, pp. 152–155.
3. Myachina K.V., Chibilev A.A., *Geoekologicheskie osobennosti neftegazodobyvayushchikh rayonov Orenburgskogo Priuraliya* [Geoecological features of oil and gas production areas of Orenburg Priuralie]. *Problemy regionalnoy ekologii – Problems of regional ecology*, 2006, no. 4, pp. 11–20.
4. Korobov V.B., Kochurov B.I. Ballnye klassifikatsii v geoecologii: preimushchestva i nedostatki [Numerical classification in ecology: advantages and disadvantages]. *Problemy regionalnoy ekologii*, 2007, no. 1. Available at: http://www.ecoregion.ru/journal.php?num=18&stat=3&pstat=1&jrn=pre&jrs_page=1&pre_page=1&eut_page=1&tpe_page=1&lng=rus (accessed 25 September 2013).
5. Shmoylova R.A., Minashkin V.G., Sadovnikova N.A. *Teoriya statistiki* [Theory of Statistics]. Moscow, Finansy i statistika, 2003. 656 p.
6. Chibilev A.A. *Entsiklopediya «Orenburzhe». Priroda* [Encyclopedia «Orenburg». Nature]. Kaluga, Zolotaya alleya, 2000. Vol. 1, 192 p.
7. *ERDAS Imagine v. 8.3. Field Guide*. Atlanta, 1997. 656 p.

УДК 626.80 (571.621)

АНАЛИЗ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МАЛЫХ РЕК, ПОДВЕРЖЕННЫХ ВЛИЯНИЮ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МЕЛИОРАЦИИ, НА ТЕРРИТОРИИ СРЕДНЕАМУРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

Зубарев Виталий Александрович,

мл. науч. сотр. лаборатории региональной геоэкологии
Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН,
Россия, 679000, ЕАО, г. Биробиджан, ул. Шолом-Алейхема, 4.
E-mail: Zubarev_1986@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью оценки экологического состояния водотоков по изменению тяжелых металлов в донных отложениях в малых реках, которые вследствие способности к аккумуляции различных поллютантов с территории водосбора в течение длительного промежутка времени могут служить индикатором экологического состояния пойменно-руслых комплексов и интегральным показателем степени загрязнения поверхностных водотоков.

Цель работы: оценка экологического состояния водотоков по изменению тяжелых металлов в донных отложениях в малых реках, подверженных влиянию мелиорации на территории Среднеамурской низменности, по сравнению с фоновыми значениями и в течение сельскохозяйственного сезона.

Методы исследования: метод атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре «Solaar 6M» и расчет суммарных коэффициентов загрязнения донных отложений в водотоках.

Результаты: в ходе работы выявлено, что в водотоках содержание тяжелых металлов в донных отложениях в фоновых точках значительно различаются друг от друга, и концентрация природных поллютантов на несколько порядков выше, чем природно-антропогенных. Наибольшие суммарные коэффициенты загрязнения имеют донные отложения, отобранные в фоновых точках, когда наблюдалась значительная миграция тяжелых металлов из затопленных пойменных почв. В исследуемых точках на снижение суммарного коэффициента загрязнения донных отложений, по сравнению с фоном, влияет увеличение водности, вследствие суммарного действия поверхностного и дренажного стоков. Осушительная сельскохозяйственная мелиорация оказывает непосредственное действие на донные отложения, при этом они могут превращаться в источник вторичного загрязнения поверхностных вод.

Ключевые слова:

Донные отложения, осушительная мелиорация, тяжелые металлы, малые водотоки, Среднеамурская низменность.

Хозяйственное освоение Среднеамурской низменности характеризуется, прежде всего, развитием сельскохозяйственного производства, и приоритетным направлением для получения высоких и устойчивых урожаев в сложных почвенно-климатических условиях является проведение осушительных работ на тяжелых по механическому составу, переувлажненных почвах [1]. Например, на равнинной части Еврейской автономной области (ЕАО) насчитывается более 5000 поверхностных водотоков, некоторые из них, в основном малые, используются как водоприемники мелиоративных стоков, при этом возможно изменение качества воды вследствие различных процессов, связанных с гидрологическим режимом и смывом поллютантов с почвенных горизонтов осушаемых массивов.

Малые реки имеют большое экологическое значение, являются основой гидрографической сети, формируют сток больших водотоков, определяют качество их вод, и при этом они очень чувствительны к различным видам антропогенной нагрузки и отвечают на нее негативными изменениями, которые ухудшают или ограничивают водопользование [2]. Формирование качества воды в них может быть обусловлено непосредственным (сброс сточных вод) и опосредованным (осушение, орошение, вырубка лесов, распашка) влиянием антропогенных источников, расположенных на данной территории, и ландшафтными особенностями конкретных водосборных бассейнов [3].

Для оценки возможного антропогенного воздействия на речные экосистемы необходимо знать не только концентрацию и формы нахождения тяжелых металлов в водной толще, но и содержание загрязняющих веществ в донных отложениях и пойменных почвах. Поэтому нами ранее было проведено исследование влияния осушительных мелиоративных работ на качество поверхностных вод и пойменных почв [4, 5], поскольку дренажные и поверхностные воды выносят из почв различные химические соединения, поступающие в водотоки, оседающие в донных отложениях, при этом часть соединений может аккумулироваться, а часть вымываться из них, вторично загрязняя поверхностные воды. Одним из наиболее информативных объектов исследований в этой цепочке могут являться донные отложения (ДО) [6], которые вследствие способности к аккумуляции различных поллютантов с территории водосбора в течение длительного промежутка времени могут служить индикатором экологического состояния пойменно-руслых комплексов и интегральным показателем степени загрязнения поверхностных водотоков. Наибольший интерес вызывает уровень содержания в них токсичных тяжелых металлов (ТМ) таких как свинец, медь, железо, цинк, ртуть, кадмий, и ряд других, концентрации которых регламентированы санитарно-гигиеническими нормативами. Особенностью ТМ является их способ-

ность накапливаться в донных отложениях, превращая их в потенциальный источник вторичного загрязнения водоёма, этот процесс наблюдается, когда ранее перешедшие из воды загрязняющие вещества в результате изменения различных физико-химических процессов (рН, Eh, биохимические реакции и т. д.) могут переходить из ДО в воду, вновь загрязняя ее [7]. Активно включаясь в миграционные циклы, ТМ аккумулируются в различных компонентах водных экосистем [8], причем особая опасность заключается в том, что, в отличие от токсикантов органической природы, в большей или меньшей степени разлагающихся в природных водах, металлы стабильны и изменяют только формы нахождения в них.

Исследования содержания ТМ только в поверхностных водах не всегда дают возможность полноценно охарактеризовать загрязнение пойменно-руслового комплекса. Как правило, концентрации в воде ТМ ниже предельно-допустимых концентраций (ПДК) для питьевого водоснабжения, что во многом определяется их быстрым переходом из растворенного во взвешенное состояние. Речные наносы, обладая высокой сорбционной способностью (особенно мелкие фракции) в процессе своего перемещения и отложения в русле реки, накапливают весь комплекс химических элементов, присутствующих в воде, поэтому целью данной работы является оценка экологического состояния водотоков по изменению тяжелых металлов в донных отложениях в малых реках, подверженных влиянию мелиорации на территории Среднеамурской низ-

менности, по сравнению с фоновыми значениями и в течение сельскохозяйственного сезона.

Основные районы проведения осушительных работ расположены в поймах малых рек, которые питают средние левобережные притоки р. Амур. На основе картографических данных выделены районы малых водотоков: Ульдура, Грязнушка, Вертопрашка, Солонечная, Осиновка (рис. 1), в которые поступают поверхностные воды, и дренажные стоки из отводных каналов осушительных мелиоративных систем по магистральным отводящим каналам. Пробы были отобраны во время полевых работ в 2009–2011 гг., которые отличались погодными условиями весенне-летних периодов, влияющих на затопление пойм: все исследуемые поймы подвергались периодическому затоплению в 2010 и 2011 гг., и постоянному затоплению в 2009 г.

Отбор проб производился выше и ниже районов проведения мелиоративных работ на каждом водотоке по ГОСТ 17.1.5.01–80, весной ($C_{\text{в}}$ и $C_{\text{ив}}$) и осенью ($C_{\text{о}}$ и $C_{\text{ю}}$). Первые из них считались фоновыми ($C_{\text{ф}}$), а вторые – исследуемыми ($C_{\text{и}}$).

Из группы тяжелых металлов выбраны типичные для Буреинской ландшафтно-геохимической провинции железо и марганец, и характерные антропогенные загрязнители данной территории: медь, никель, кобальт, свинец и цинк, обладающие различными физико-химическими, биохимическими и токсикологическими свойствами.

Пробоподготовка образцов проводилась по стандартным методикам [9]. В каждой пробе определялось содержание водорастворимых форм ТМ

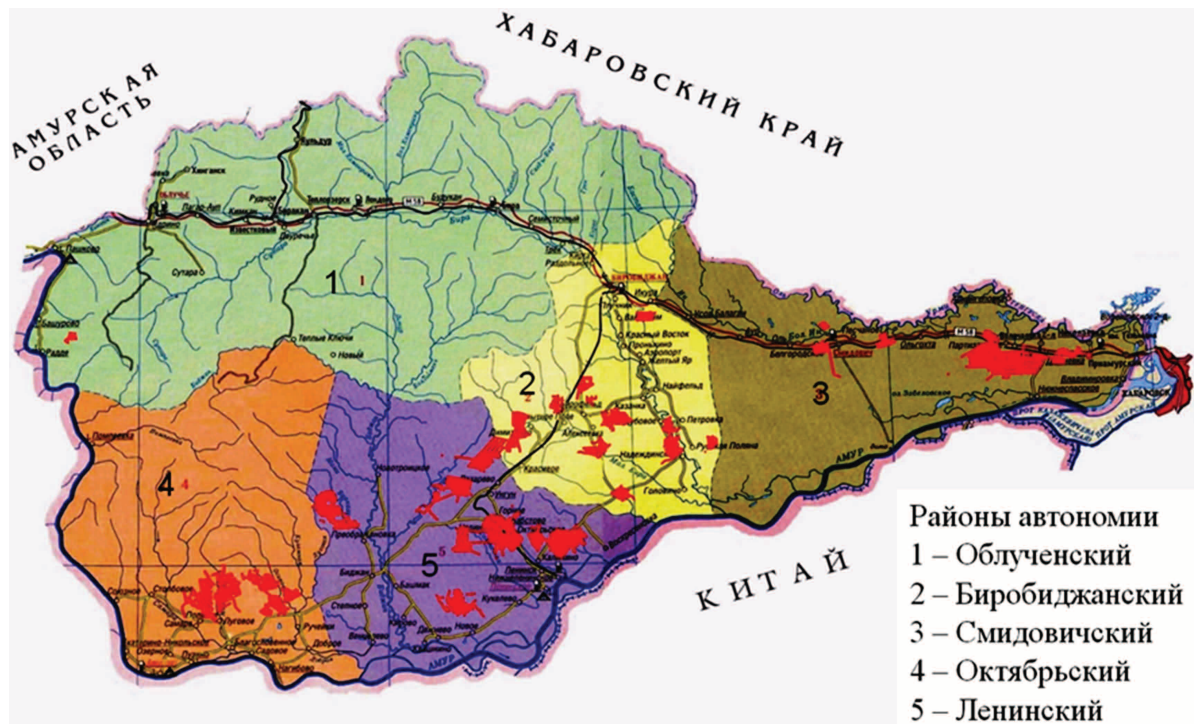


Рис. 1. Районы проведения осушительных мелиорационных работ на малых водотоках в Еврейской автономной области

методом атомно-абсорбционной спектрометрии на спектрометре «Solaar 6M» [10].

Для анализа поэлементного техногенного загрязнения рассчитан показатель накопления (ПН) [11], который основан на нормировании приращенной содержания каждого из поллютантов к фону:

$$ПН = \frac{C_i - C_f}{C_f}, \quad (1)$$

где C_i – концентрация ТМ в донных отложениях в исследуемой точке; C_f – концентрация ТМ в фоновой точке на том же водотоке.

Для анализа суммарного техногенного воздействия рассчитан суммарный коэффициент загрязнения:

$$Z_{cf} = \sum(K_c) - (n-1), \quad (2)$$

$$K_c = C_{fo}/C_{fb}, \quad (3)$$

$$Z_{ci} = \sum(K_c) - (n-1), \quad (4)$$

$$K_c = C_{io}/C_{ib}. \quad (5)$$

В ДО региональное содержание ТМ и процессы их переноса и аккумуляции для фоновых точек неизвестны, поэтому предварительно был проведен анализ изменения их химического состава (табл. 1).

Как видно из данных, приведенных в табл. 1, во всех водотоках содержание ТМ в ДО в фоновых точках значительно отличается друг от друга, концентрация природных поллютантов на несколько порядков выше, чем природно-антропогенных. Так, в весенний период наибольшие концентрации (мг/кг) Fe (26,0), Mn (9,0), Cu (4,0), Pb (0,8) и Zn (0,14) обнаружены в донных отложениях р. Грязнушка; Ni (0,9) – в р. Ульдура; и Co (0,9) – в р. Солонечная. К осени происходит снижение концентрации ТМ практически во всех донных отложениях, но в р. Вертопрашиха содержание Fe увеличивается в 2 раза. Возможно, это детерминировано различными типами почв, уклонами русел, скоростями течения и интенсивностью поверхностного и подземного стоков в различные временные периоды, и физико-химическими свойствами самих элементов. Так, поймы р. Ульдура и Грязнушка относятся к подзолисто-буроземным глинистым и суглинистым, р. Вертопрашиха и Солонечная – к лугово-глинистым, р. Осинковка – к лугово-болотным типам почв с глинистыми фракциями, миграция ТМ с которых зависит от прочности их связи с почвенными комплексами.

Переменный характер химического состава ДО в фоновых точках определяет необходимость синхронного отбора проб в них и в исследуемых точках для проведения сравнительного анализа влияния дренажных вод с мелиорированных систем на состояние водотоков.

В исследуемых точках в весенний период наибольшие концентрации Fe и Mn обнаружены в ДО р. Солонечная; Ni, Pb и Zn – в р. Ульдура; Cu – в р. Грязнушка; Co – в р. Вертопрашиха. К осени

происходит изменение содержания ТМ: в р. Ульдура – снижение концентрации Fe в 1,5, Mn в 4 и Pb в 1,4 раза, в р. Грязнушка увеличивается концентрация Zn в 5, Fe, Mn и Pb в 2 раза, содержание Ni, Co и Cu снижается в 1,5 раз; в р. Вертопрашиха происходит снижение содержания Mn, Ni, Co, примерно в 4 раза, увеличение концентрации Zn в 7 раз; в р. Солонечной, Осинковка наблюдается снижение содержания практически всех поллютантов, кроме Zn (табл. 2).

Таблица 1. Фоновые концентрации водорастворимых форм тяжелых металлов в донных отложениях малых водотоков

ТМ	Период	Водотоки				
		Ульдура	Грязнушка	Вертопрашиха	Солонечная	Осиновка
		Концентрация, мг/кг				
Fe	весна	<u>7,0–24,0</u> 14,6	<u>6,0–26,0</u> 14,4	<u>6,0–11,0</u> 9,0	<u>4,0–18,0</u> 9,6	<u>5,0–28,0</u> 14,5
	осень	<u>6,0–11,0</u> 8,6	<u>3,0–21,0</u> 12,0	<u>4,0–57,0</u> 22,0	<u>3,0–6,0</u> 5,0	<u>2,0–10,0</u> 7,0
Mn	весна	<u>1,0–5,0</u> 3,2	<u>0,3–9,0</u> 3,3	<u>0,6–4,5</u> 2,0	<u>1,0–2,0</u> 1,4	<u>0,7–5,0</u> 2,1
	осень	<u>5,0–13,0</u> 6,3	<u>0,3–22,0</u> 8,5	<u>0,2–2,0</u> 1,0	<u>0,1–1,0</u> 0,7	<u>0,2–11,0</u> 3,0
Ni	весна	<u>0,2–0,9</u> 0,5	<u>0,2–0,6</u> 0,4	<u>0,3–0,7</u> 0,4	<u>0,2–0,5</u> 0,4	<u>0,3–0,5</u> 0,3
	осень	<u>0,1–0,2</u> 0,1	<u>0,4–1</u> 0,5	<u>0,1–0,4</u> 0,2	<u>0,1–0,3</u> 0,2	<u>0–0,3</u> 0,2
Co	весна	<u>0,2–0,6</u> 0,4	<u>0,1–0,8</u> 0,5	<u>0–0,7</u> 0,4	<u>0–0,9</u> 0,4	<u>0–0,8</u> 0,4
	осень	<u>0,2–0,4</u> 0,3	<u>0,2–0,5</u> 0,3	<u>0,2–0,3</u> 0,2	<u>0,1–0,2</u> 0,2	<u>0,1–0,3</u> 0,2
Cu	весна	<u>0,2–0,9</u> 0,5	<u>0,8–4</u> 2,2	<u>0–0,2</u> 0,1	<u>0,1–0,2</u> 0,1	<u>0,2–0,5</u> 0,3
	осень	<u>0–0,6</u> 0,3	<u>0–2</u> 0,6	<u>0–1</u> 0,5	<u>0–0,3</u> 0,1	<u>0–0,3</u> 0,2
Pb	весна	<u>0,2–0,5</u> 0,3	<u>0,1–0,8</u> 0,4	<u>0–0,5</u> 0,3	<u>0–0,2</u> 0,1	<u>0–0,1</u> 0,1
	осень	<u>0–0,4</u> 0,3	<u>0–0,7</u> 0,3	<u>0–0,3</u> 0,2	<u>0–0,2</u> 0,1	<u>0–0,1</u> 0,1
Zn	весна	<u>0,1–0,3</u> 0,2	<u>0,2–0,4</u> 0,3	<u>0–0,3</u> 0,1	<u>0–0,2</u> 0,1	<u>0–0,2</u> 0,1
	осень	<u>0,1–0,3</u> 0,2	<u>0,1–0,3</u> 0,2	<u>0,1–0,1</u> 0,6	<u>0,1–3</u> 1,5	<u>0,1–3</u> 1,5

Примечание: числитель – минимальное и максимальное значение, знаменатель – среднее значение концентраций ТМ.

Для сравнения процессов концентрирования каждого из ТМ в исследуемых и фоновых точках, проведен анализ показателей накопления ПН по внутригодовым сезонам (рис. 2)

Показатели накопления, как весной, так и осенью, в основном имеют отрицательные значения, т. е. в исследуемых точках по сравнению с фоновыми преобладают процессы миграции ТМ из ДО в воду; положительные значения ПН (седиментация) характерны только для весенних периодов в р. Солонечной для Fe, Cu и Mn, в р. Ульдура для Zn; осенью в р. Грязнушка для Fe и Zn и в р. Ульдура для Ni (рис. 2). Такие процессы могут быть связаны с различным изменением pH воды в водо-

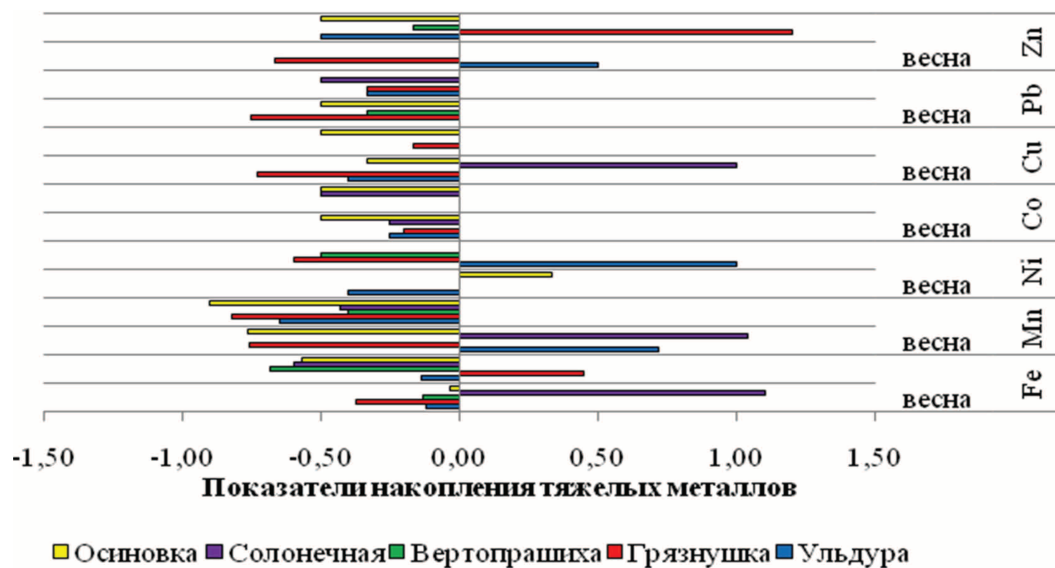


Рис. 2. Показатели накопления тяжелых металлов в донных отложениях

токах в зонах мелиорации, которое может влиять на соотношение гидроксидов ТМ.

Таблица 2. Концентрации водорастворимых форм тяжелых металлов в донных отложениях малых водотоков в исследуемых точках

ТМ	Период	Водотоки				
		Ульдур	Грязнушка	Вертопрашиха	Солонечная	Осиновка
		Концентрация, мг/кг				
Fe	весна	6,0–21,0 12,8	6,0–12,0 9,0	4,0–1,0 7,8	6,0–57,0 25,0	10,0–18,0 14,0
	осень	7,0–12,0 9,8	10,0–25,0 17,4	2,0–13,0 7,0	4,0–11,0 8,0	5,0–16,0 11,0
Mn	весна	4,0–6,0 5,5	0,2–2,0 0,8	0,4–5,0 2,0	1,0–7,0 0,30	0,02–0,1 0,05
	осень	0,3–5,0 2,2	3,0–4,0 3,5	0,4–1,0 0,6	0,3–1,0 1,0	0,1–0,5 0,3
Ni	весна	0,1–0,6 0,3	0,2–0,5 0,4	0,2–0,5 0,4	0,3–0,5 0,4	0,2–0,5 0,4
	осень	0–0,6 0,3	0–0,5 0,2	0–0,1 0,05	0–0,4 0,2	0–0,4 0,2
Co	весна	0,1–0,7 0,3	0,1–0,8 0,4	0–0,9 0,4	0–0,9 0,3	0–0,5 0,2
	осень	0,2–0,5 0,3	0,2–0,4 0,3	0,1–0,4 0,2	0–0,3 0,1	0,1–0,2 0,1
Cu	весна	0,1–0,6 0,3	0,1–1 0,6	0–2 0,5	0–0,5 0,3	0–0,5 0,2
	осень	0–0,6 0,3	0–1 0,5	0–0,2 0,1	0–0,4 0,1	0–0,4 0,1
Pb	весна	0,1–0,6 0,3	0,1–0,2 0,1	0–0,6 0,3	0–0,1 0,05	0–0,2 0,1
	осень	0–0,3 0,2	0–0,3 0,2	0–0,4 0,2	0–0,1 0,1	0–0,2 0,1
Zn	весна	0,2–0,4 0,3	0,1–0,2 0,1	0–0,2 0,1	0–0,3 0,1	0–0,2 0,1,0
	осень	0,2–0,4 0,3	0,2–1 0,5	0,1–1 0,7	0–3,0 1,0	0,1–4,0 1,5

Примечание: числитель – минимальное и максимальное значение, знаменатель – среднее значение концентраций ТМ.

Оценка изменения экологического состояния донных отложений в течение сезона мелиорации проведена на основе суммарного коэффициента загрязнения (табл. 3).

Таблица 3. Суммарный коэффициент загрязнения донных отложений малых водотоков

Водотоки	Год					
	2009		2010		2011	
	Суммарный коэффициент загрязнения					
	Фоновая точка (Z_{cf})	Исследуемая точка (Z_{ci})	Фоновая точка (Z_{cf})	Исследуемая точка (Z_{ci})	Фоновая точка (Z_{cf})	Исследуемая точка (Z_{ci})
Ульдур	0,69	1,32	2,69	1,11	1,17	0,64
Грязнушка	7,06	2,98	3,42	3,06	2,10	1,70
Вертопрашиха	18,89	10,58	4,84	2,58	3,39	5,20
Солонечная	16,33	7,05	2,54	2,93	1,60	2,19
Осиновка	38,09	12,91	4,03	0,83	1,39	0,65

Наибольшие суммарные коэффициенты загрязнения имеют донные отложения, отобранные в фоновых точках, особенно в 2009 г., когда наблюдалась значительная миграция ТМ из затопленных пойменных почв [12]. В исследуемых точках на снижение коэффициента Z_{ci} по сравнению с Z_{cf} , влияет уменьшение концентрации поллютантов (табл. 2), причиной которых может быть увеличение водности вследствие суммарного действия поверхностного и дренажного стоков.

Таким образом, проведенные исследования показали, что во всех водотоках содержание тяжелых металлов в донных отложениях значительно отличаются друг от друга, концентрация природных поллютантов на несколько порядков выше, чем природно-антропогенных. Возможно, это детерминруется различными типами почв, уклонами русел, скоростями течения и интенсивностью поверх-

ностного и подземного стоков в различные временные периоды, и физико-химическими свойствами самих элементов. Вследствие стока дренажных вод с осушаемого массива, особенно в период обильного выпадения атмосферных осадков, происходит уве-

личение водности суммарного действия поверхностных и дренажных вод, приводящее к интенсивному извлечению тяжелых металлов из донных отложений, при этом они могут превращаться в источник вторичного загрязнения поверхностных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов Б.А., Махинов А.Н. Современное состояние водных ресурсов Дальнего Востока и их антропогенное преобразование // 100-летие Камчатской экспедиции Русского географического общества 1908–1910 гг.: Матер. Всерос. науч. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2008. – С. 54–63.
2. Калинин В.М., Ларин С.И., Романова И.М. Малые реки в условиях антропогенного воздействия. – Тюмень: ТюмГУ, 1998. – 220 с.
3. Беляев С.Д. Использование целевых показателей качества воды при планировании водохозяйственной деятельности // Водное хозяйство России. – 2007. – № 3. – С. 3–17.
4. Зубарев В.А., Коган Р.М. Влияние осушительной мелиорации на процессы миграции тяжелых металлов в системе почва – вода – донные отложения // Проблемы агрохимии и экологии. – 2010. – № 3. – С. 29–33.
5. Аношкин А.В., Зубарев В.А. Трансформация пойменно-руслowych комплексов рек Среднеамурской низменности в условиях мелиорации // География и природные ресурсы. – 2012. – № 2. – С. 82–86.
6. Кужина Г.Ш., Янтурин С.И. Исследование загрязнения тяжелыми металлами донных отложений верхнего течения р. Белой // Вестник ОГУ. – 2009. Октябрь. Специальный выпуск. – С. 84–86.
7. Отмахов В.И. Методика оценки экологической безопасности водного бассейна по загрязнению донных отложений // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 6. – С. 39–41.
8. Третьякова Е.И., Папина Т.С., Эйрих А.Н. Влияние сульфидной фракции на поведение тяжелых металлов в донных отложениях // Ползуновский вестник. – 2008. – № 1–2. – С. 144–147.
9. ГОСТ 17.4.4.02–84. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Стандартинформ, 1985. – 8 с.
10. Федоров А.С. Устойчивость почв к антропогенным воздействиям. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2008. – 204 с.
11. Концентрации тяжелых металлов в донных отложениях Верхней Волги / В.И. Косов, Г.Н. Иванов, В.В. Левинский, Е.В. Ежов // Водные ресурсы. – 2001. – Т. 28. – № 4. – С. 448–453.
12. Зубарев В.А. Исследование содержания тяжелых металлов в пойменных почвах районов проведения сельскохозяйственной осушительной мелиорации (на примере Еврейской автономной области) // Региональные проблемы. – 2012. – № 15 (1). – С. 63–68.

Поступила 26.07.2013 г.

UDC 626.80 (571.621)

ANALYSIS OF HEAVY METAL IN BOTTOM DEPOSITS OF SMALL RIVERS EFFECTED BY AGRICULTURAL RECLAMATION ON SREDNEAMURSKAYA LOWLAND

Vitaly A. Zubarev,

Federal state budgetary establishment of science – Institute for complex analysis of regional problems of the Russian Academy of Sciences, Far Eastern branch (ICARP FEB RAS), Russia, Jewish Autonomous Region, 679000, Birobidzhan, Sholom-Aleykhem street, 4. E-mail: Zubarev_1986@mail.ru

The relevance of the work is caused by the need to assess the ecological status of watercourses by the change of heavy metals in sediments of small rivers which can serve as an indicator of ecological state of floodplain-channel complexes and the integral indicator of water surface pollution degree because of potential for accumulation of various pollutants in the catchment area for a long period of time.

The main aim of the study is the assessment of the environmental status of watercourses by the change of heavy metals in sediments of small rivers effected by reclamation in Sredneamurskaya lowland, compared with the baseline values, and during the growing season.

The methods used in the study: atomic absorption spectrometry on the spectrometer «Solaar 6M» and calculation of total fertility contamination of sediments in streams.

The results: The authors have found out that the content of heavy metals in sediments in the background points differ significantly from each other, and the concentration of natural pollutants is higher by several orders of magnitude than the natural and man-made ones. The bottom sediments selected from points in the background when there was a significant migration of heavy metals from flooded floodplain soils have the highest coefficients of total pollution. In the points investigated the total water content influences due to the coefficient of surface and drainage runoff the decrease of concentration of sediment pollution in comparison with the background. Agricultural drainage reclamation has a direct effect on bottom sediments; the latter can turn into a source of secondary pollution of surface waters.

Key words:

Sediments, drainage reclamation, heavy metals, small watercourses, Middle Amur lowland.

REFERENCES

1. Voronov B.A., Makhinov A.N. Sovremennoe sostoyanie vodnykh resursov Dalnego Vostoka i ikh antropogennoe preobrazovanie [Current state of water resources of the Far East and their anthropogenic transformation]. *100-letie Kamchatskoy ekspeditsii Russkogo geograficheskogo obshchestva 1908–1910 gg. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [The one hundred anniversary of expedition of Russian geographical society to Kamchatka in 1908–1910. Proc. All-Russian scientific conference]. Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2008. pp. 54–63.
2. Kalinin V.M., Larin S.I., Romanova I.M. *Malye reki v usloviyakh antropogennoy vozdeystviya* [Small rivers under anthropogenic impact]. Tyumen, TyumGU, 1998. 220 p.
3. Belyaev S.D. Ispolzovanie tselevykh pokazateley kachestva vody pri planirovaniy vodokhozyaystvennoy deyatel'nosti [Using the water quality targets in the planning of water management]. *Vodnoye khozyaystvo Rossii*, 2007, no. 3, pp. 3–17.
4. Zubarev V.A., Kogan R.M. Vliyanie osushitel'noy melioratsii na protsessy migratsii tyazhelykh metallov v sisteme pochva–voda–donnye otlozheniya [Influence of amelioration on migration of heavy metals in the soil–water–sediment system]. *Problemy agrokhimii i ekologii*, 2010, no. 3, pp. 29–33.
5. Anoshkin A.V., Zubarev V.A. Transformatsiya poymenno-ruslovnykh kompleksov rek Sredneamurskoy nizmennosti v usloviyakh melioratsii [Transformation of floodplain-channel complexes of Sredneamurskaya lowland rivers under reclamation]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2012, no. 2, pp. 82–86.
6. Kuzhina G.Sh., Yanturin S.I. Issledovanie zagryazneniya tyazhelymi metallami donnykh otlozheniy verkhnego techeniya r. Beloy [Investigation of heavy metal contamination of sediments of the upper reaches of the river Balaya]. *Vestnik OGU*, 2009, October, Special Iss., pp. 84–86.
7. Otmakhov V.I. Metodika otsenki ekologicheskoy bezopasnosti vodnogo basseyna po zagryazneniyu donnykh otlozheniy [Methodology to evaluate the environmental safety of the water basin for sediment contamination]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2003, vol. 306, no. 6, pp. 39–41.
8. Tretyakova E.I., Papina T.S., Eyrikh A.N. Vliyanie sulfidnoy fraktsii na povedenie tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyah [Sulfide fraction influence on heavy metal behavior in sediments]. *Polzunovskiy vestnik*, 2008, no. 1–2, pp. 144–147.
9. GOST 17.4.4.02–84. *Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gelmintologicheskogo analiza* [Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Moscow, Standartinform Publ., 1985.
10. Fedorov A.S. *Ustoychivost pochv k antropogennym vozdeystviyam* [Stability of soils to anthropogenic influences]. Saint Petersburg, SPbGU Publ., 2008. 204 p.
11. Kosov V.I., Ivanov G.N., Levinskiy V.V., Ezhov E.V. Kontsentratsii tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyah Verkhney Volgi [Concentrations of heavy metals in sediments of the Upper Volga]. *Vodnye resursy*, 2001, vol. 28, no. 4, pp. 448–453.
12. Zubarev V.A. Issledovanie soderzhaniya tyazhelykh metallov v poymennykh pochvakh rayonov provedeniya selskohozyaystvennoy osushitel'noy melioratsii (na primere Evreyskoy avtonomnoy oblasti) [Study of heavy metals in floodplain soils of agricultural areas amelioration (by the example of the Jewish Autonomous Region)]. *Regionalnye problemy*, 2012, no. 15 (1), pp. 63–68.

УДК 556.114.6(571.53)

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПИТЬЕВЫХ ВОД БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА

Соктоев Булат Ринчинович,

аспирант кафедры геоэкологии и геохимии
Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050,
г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: bulatsoktoev@gmail.com

Рихванов Леонид Петрович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии
Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050,
г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: rikhvanov@tpu.ru

Тайсаев Трофим Табанович,

д-р геогр. наук, профессор кафедры физической географии
биолого-географического факультета Бурятского государственного универ-
ситета, Россия, 670000, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а.
E-mail: taisaev@bsu.ru

Барановская Наталья Владимировна,

д-р биол. наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии
Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050,
г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: natalya.baranovs@mail.ru

Актуальность работы обусловлена слабой изученностью объекта исследования и возможностью его применения в практике экологических и геохимических исследований.

Цель работы: оценка содержания 27 химических элементов, в том числе редких, редкоземельных и радиоактивных, и выявление их индикаторного значения в солевых отложениях питьевых вод (накипи), формирующихся в процессе многократного кипячения и остывания в теплообменной аппаратуре, на территории Байкальского региона.

Методы исследования: метод инструментального нейтронно-активационного анализа (определение элементного состава); рентгеновская дифрактометрия (ДРОН-3М, D8 Advance Bruker), электронная микроскопия (вещественный анализ).

Результаты: На основе большого фактического материала показано, что элементный состав солевых отложений отражает особенности влияния природных и техногенных факторов на формирование химического состава вод, используемых для питьевого водоснабжения. Выявлена специфика накопления химических элементов в накипи на территории изученных районов, обусловленная особенностями геологического строения и степенью техногенной нагрузки. Выделены возможные индикаторные ассоциации элементов процессов рифтогенеза на территории Усть-Баргузинской впадины и Тункинской котловины. По показателям накопления урана в солевых образованиях определены потенциальные ураноносные районы. Выделены геохимические типы накипи по уровням концентрирования элементов и их ассоциациям.

Ключевые слова:

Солевые отложения (образования), накипь, геохимическая специализация, типизация, Байкальский регион, рифтогенез, техногенез, золото, серебро, редкие земли, уран.

Постановка вопроса

Природные ландшафтные комплексы Байкальского региона характеризуются разнообразием типов, зависящих от природно-климатических, геолого-геохимических особенностей и техногенных факторов. Расположение его на стыке двух крупных геологических структур: Сибирской платформы и обрамляющего его складчатого пояса, так называемой Саяно-Байкальской горной области, обусловило специфику развития на данной территории структурно-формационных зон с различной геохимической специализацией слагающих пород и, соответственно, различными металлогеническими особенностями [1]. Немаловажным фактором, оказывающим влияние на геохимию природных ландшафтов региона, является

Байкальская рифтовая зона. Техногенная нагрузка на данной территории является достаточно сильной, но носит локальный характер и наиболее полно отмечается в районах Иркутско-Черемховского промышленного узла и г. Улан-Удэ. Широкое развитие горнодобывающей и перерабатывающей промышленности привело к повсеместному загрязнению природных сред территорий, прилегающих к месторождениям, комбинатам, фабрикам, например, Байкальскому целлюлозно-бумажному комбинату, Джидинскому вольфрамо-молибденовому комбинату, Хиагдинскому месторождению урана и другим. Исследование особенностей геохимии окружающей среды включает в себя изучение максимального количества природных сред: коренных пород, подземных и поверх-

ностных вод, донных отложений, почв, растительности и других [1–10].

Нами предлагается к изучению новая, сравнительно малоизученная среда – солевые отложения (образования) питьевых вод (накипь), на наш взгляд, дающая новую дополнительную эколого-геохимическую информацию. Существует классическое определение термина «накипь», приведенное в Большой советской энциклопедии: «Накипь – твердые отложения, образующиеся на внутренних стенках паровых котлов, водяных экономайзеров, пароперегревателей, испарителей и других теплообменных аппаратов, в которых происходит испарение или нагревание воды, содержащей те или иные соли» [11]. В наших исследованиях изучается накипь, образующаяся в теплообменной аппаратуре из вод, используемых для питьевого водоснабжения. Необходимо отметить, что понятия «солевые отложения», «солевые образования» и «накипь» в данном случае являются синонимами.

Исследование элементного и вещественного состава солевых отложений как индикатора качества питьевых вод и эколого-геохимического состояния территорий с различной антропогенной нагрузкой было начато в процессе реализации программ «Радиационный мониторинг» и «Оценка качества среды обитания человека с целью выделения возможного воздействия радиационного фактора заболеваемости» на территории юга Томской области [12, 13].

Как показывают исследования, элементный состав солевых отложений отражает смену геохимических обстановок, обусловленную факторами природно-техногенного характера, наследуя химический состав воды [12, 14–16]. Уровень содержания макро- и микроэлементов в накипи зависит от геохимических особенностей территории. Сильное влияние на формирование ее состава оказывают природные (месторождения, рудопроявления) и техногенные (промышленные предприятия, урбанизированные образования) источники.

Преимущество используемого нами такого объекта исследования, как накипь, состоит в том, что эта среда, являясь депонирующей, отражает длительный временной интервал ее накопления из воды (месяцы, годы), тем самым она дает не одномоментный показатель состава воды, который достаточно изменчив, а представляет долговременную картину химического состава питьевых вод [17].

Элементный состав накипи отражает качество питьевых вод, употребляемых каждый день и являющихся одним из основных поставщиков химических элементов в организм человека. На примере урана была доказана закономерность: чем выше его содержание в воде, тем больше радионуклида в накипи [18]. Также исследованиями показана сходность элементного состава солевых отложений и крови человека [19].

Целью данного исследования является показать возможность использования солевых отложений питьевых вод для оценки эколого-геохимической обстановки и качества питьевых вод на терри-

тории Байкальского региона, характеризующегося сложными геологическими условиями, различными металлогеническими особенностями, разной степенью техногенной нагрузки и трансформации природной среды. Ранее подобные исследования проводились лишь на территории Боханского и Осинского районов Усть-Ордынского Бурятского округа Иркутской области [6, 20].

Материалы и методы исследования

Объектом исследования явились солевые отложения (накипь) из бытовой посуды, используемой для кипячения питьевой воды. *Предметом исследования* является ее элементный и вещественный состав.

Работы проводились в период с 2009 по 2012 гг. на территории Байкальского региона, в шести районах: правобережье и левобережье р. Ангара (Усть-Ордынский Бурятский округ Иркутской области), в том числе из населенных пунктов, расположенных в зоне возможного влияния подземного ядерного взрыва «Рифт-3»; Закаменский район, в том числе на территории влияния хвостохранилищ бывшего Джидинского вольфрамо-молибденового комбината; Боргойская впадина; Усть-Баргузинская впадина, Тункинская котловина, пригород г. Улан-Удэ (все – Республика Бурятия). Общее количество населенных пунктов, в которых были отобраны пробы накипи, составляет 67, общее количество проб – 152 (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1. Изученность районов исследования

Район исследования	Количество проб
Иркутская область	
Правобережье р. Ангара	64
Левобережье р. Ангара	21
Республика Бурятия	
Закаменский район	30
Боргойская впадина	8
Усть-Баргузинская впадина	11
Тункинская котловина	2
Пригород г. Улан-Удэ	16
Всего	152

На сегодняшний день отсутствуют ГОСТы или методические указания, регламентирующие отбор, пробоподготовку и анализ проб накипи, поэтому авторы при исследовании руководствовались методикой, изложенной в патенте [13].

Солевые образования в виде накипи отбирались из различной посуды, в которой многократно кипятилась питьевая вода (эмалированные и электрические чайники, кастрюли, котлы, самовары), постукиванием. В случае если накипь была прочно закреплена на стенках посуды, отбор выполнялся с помощью ножа, изготовленного из нержавеющей стали: накипь осторожно снималась со стенок бытовой теплообменной посуды. В каждом случае фиксировался тип посуды, в которой кипятилась вода, и глубина залегания водоносного горизонта. В тех случаях, когда было возможно в одном и том

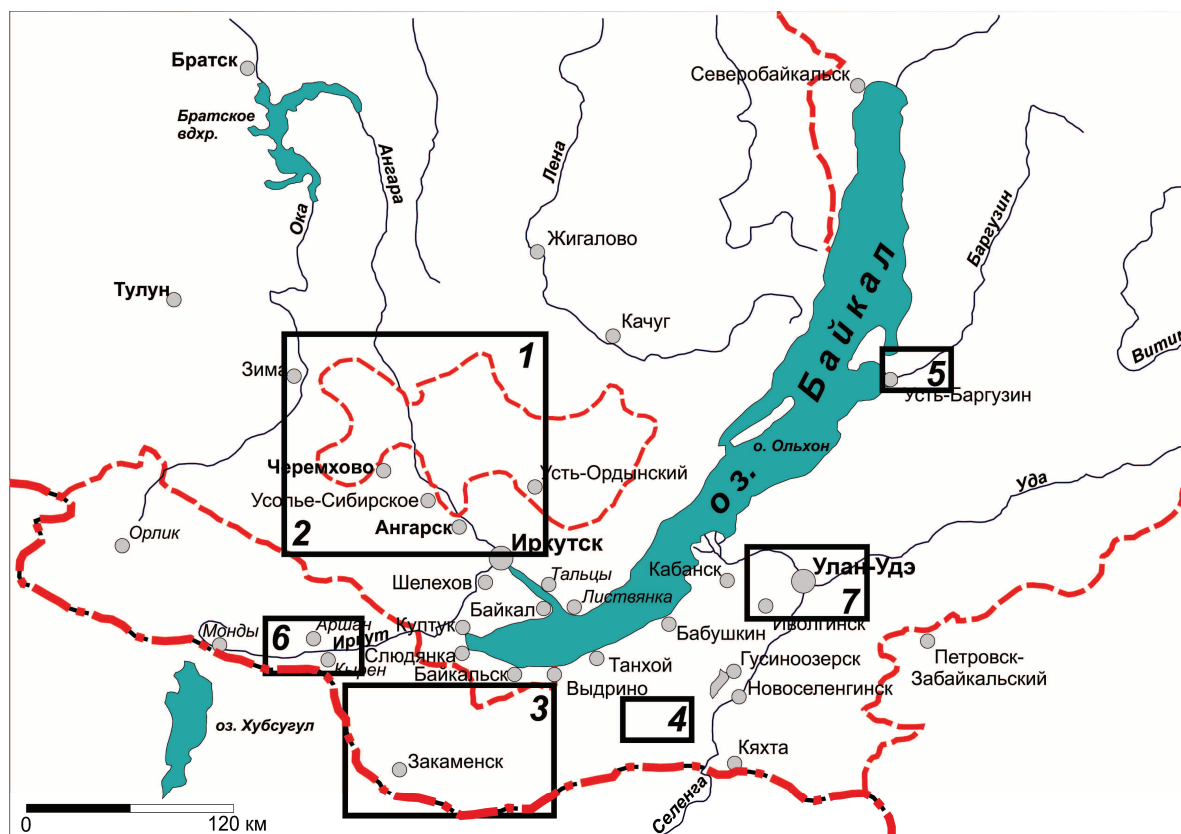


Рис. 1. Карта размещения изученных районов: 1 – правобережье р. Ангара; 2 – левобережье р. Ангара (Иркутская область); 3 – Закаменский район; 4 – Боргойская впадина; 5 – Усть-Баргузинская впадина; 6 – Тункинская котловина; 7 – пригород г. Улан-Удэ (все – Республика Бурятия)

же дворе отобрать накипь из разной по типу посуды (пластмассовые чайники, металлические чайники и самовары), то это в обязательном порядке выполнялось. После получения результатов анализа проводилось сопоставление данных, чтобы увидеть эффект влияния состава материала теплообменной аппаратуры на химический состав накипи. Результаты сравнения, как правило, свидетельствуют об отсутствии эффекта влияния как на химический, так и на минеральный состав накипи (рис. 2).

Во всех полученных пробах использовалась водопроводная или колодезная вода, которая идет на питьевое водоснабжение. Подготовка проб накипи к анализу включала в себя следующие стадии: 1) высушивание образца при комнатной температуре; 2) истирание в агатовой ступке до состояния пудры; 3) развешивание по 100 мг и упаковка в пакетики из алюминиевой фольги. Элементный состав солевых отложений определялся методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА), выполненного в аккредитованной ядерно-геохимической лаборатории (ЯГЛ) Томского политехнического университета по аттестованному методикам (аналитики – с.н.с. Судыко А.Ф., Богутская Л.Ф.), определялось содержание 27 химических элементов. Пределы обнаружения элементов методом ИНАА приведены в табл. 2. В каче-

стве контроля использовался стандартный образец (ГСО 7126–94) состава байкальского ила БИЛ-1.

Таблица 2. Сравнительная оценка результатов элементного анализа, полученного методом ИНАА, с паспортными данными БИЛ-1 (Россия)

Элемент, мг/кг	БИЛ-1		Предел обнаружения, мг/кг	Элемент, мг/кг	БИЛ-1		Предел обнаружения, мг/кг
	Пас- порт	ЯГЛ			Пас- порт	ЯГЛ	
Na, %	1,93	1,74	0,001	Ba	670	864	10
Ca, %	1,86	6,76	0,03	La	51	40	0,01
Sc	13	16	0,02	Ce	81,5	70	0,06
Cr	67	69	0,2	Sm	7,9	6,79	0,01
Fe, %	7,01	7,13	0,01	Eu	1,65	1,96	0,004
Co	18,5	17	0,1	Tb	0,95	0,94	0,005
Zn	–	–	10	Yb	3	2,44	0,009
As	–	–	0,3	Lu	0,44	0,46	0,001
Br	–	–	1	Ta	0,9	0,9	0,01
Rb	96	118	0,5	Au	–	–	0,005
Sr	–	–	100	Hf	4,1	5,13	0,009
Ag	–	–	0,3	Th	12	12,5	0,01
Sb	1,5	1,52	0,05	U	12	10,7	0,06
Cs	5,9	6,7	0,01				

Проведенный внутренний контроль позволяет говорить об удовлетворительной сходимости (рис. 3).

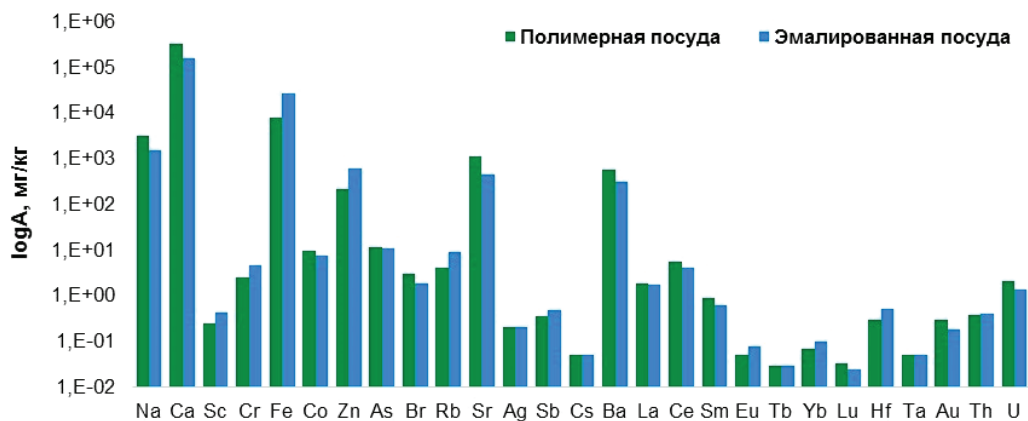


Рис. 2. Сравнительный анализ содержания химических элементов в накипи, образующейся в разной посуде [18]

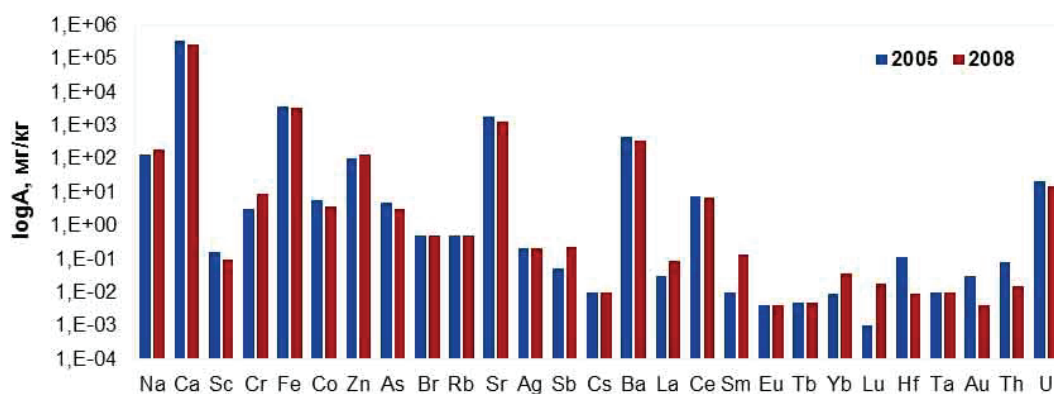


Рис. 3. Внутренний контроль инструментального нейтронно-активационного анализа

Результаты и их обсуждение

Вещество накипи в большинстве случаев, как показывают данные рентгенофазового анализа, представлено кальцитом и арагонитом с незначительной примесью железистой и магниевой разновидностей, присутствует примесь глинистых минералов и гидроксидов железа. По своему мине-

ральному составу они соответствуют составу травертинов из различных регионов мира – карбонатной породы, образовавшихся в результате осаждения карбонатов Ca, Mg, Fe, Na из термальных или холодных углекислых источников. Это видно, например, при сравнительном анализе вещества травертина Паммукале и образцов накипи (рис. 4) [18].

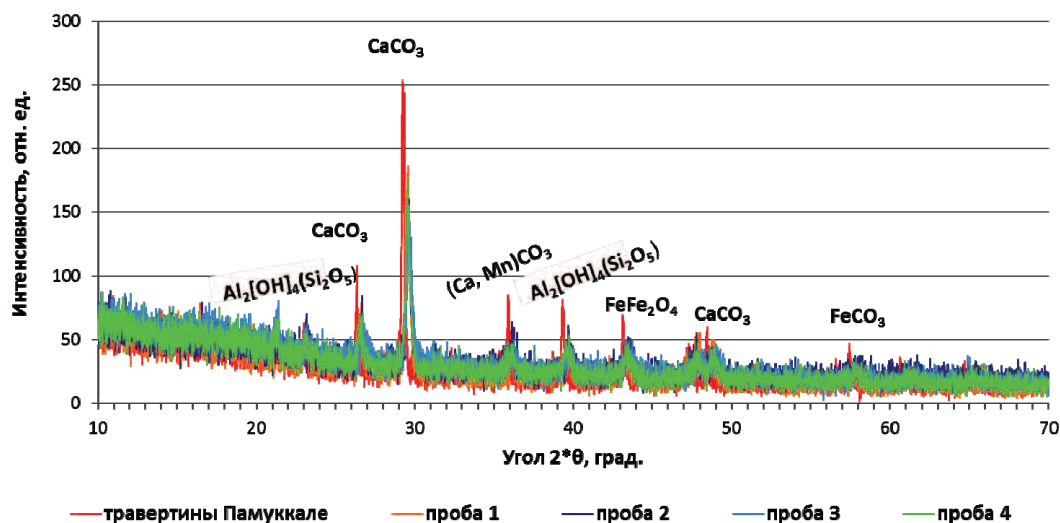


Рис. 4. Данные рентгенофазового анализа проб травертина Паммукале (Турция) и накипи питьевых вод [18]

Таблица 3. Содержание элементов в солевых отложениях питьевых вод (накипи) Байкальского региона, мг/кг

Элемент	Правобережье р. Ангара		Левобережье р. Ангара (21)	Закаменский район (30)	Боргойская впадина (8)	Усть-Баргузинская впадина (11)	Пригород г. Улан-Удэ (16)	Тункинская котловина (2)	Среднее по региону	Накипь воды оз. Байкал
	Боханский район (28)	Осинский район (36)								
Na, %	0,04±0,005 0,006..1,0	0,03±0,005 0,004..0,091	0,007±0,001 0,0006..0,0212	0,01±0,002 0,0014..0,032	0,05±0,009 0,0187..0,5353	0,18±0,05 0,01..0,535	0,03±0,006 0,007..0,09	0,03..0,221	0,046	1,3
Ca, %	36,9±1,56 27,08..64,95	33,8±0,91 23,73..43,8	26,14±0,42 22,8..30,4	25,98±0,92 0,7..29,0	25,0±0,51 23,6..27,1	16,08±2,6 0,8..27,98	22,65±1,57 1,5..30,6	13..27,87	28,8	24,2
Sc	0,06±0,02 0,002..0,399	0,16±0,03 0,004..0,6	0,09±0,01 0,02..0,27	0,09±0,02 0,008..0,561	0,13±0,03 0,04..0,236	0,6±0,1 0,142..3,669	0,16±0,03 0,014..0,401	0,05..0,099	0,15	0,45
Cr	2,2±0,5 0,02..164,47	3,3±0,6 0,02..2212,8	1,3±0,3 0,3..5,3	2,9±0,7 0,14..17,84	1,8±0,5 0,49..212,6	15,3±5,0 3,51..413,65	3,1±0,44 0,4..63,23	0,44	3,4	8,3
Fe, %	0,12±0,02 0,006..0,463	0,14±0,02 0,001..4,432	0,12±0,03 0,004..0,546	0,17±0,05 0,003..1,332	0,21±0,09 0,032..1,169	0,83±0,25 0,12..33,55	0,23±0,06 0,03..1,19	0,81..0,83	0,2	0,15
Co	3,5±1,3 0,04..29,56	5,6±2,8 0,27..100,66	4,2±0,8 0,45..9,3	4,8±2,1 0,14..52,55	1,2±0,3 0,27..2,84	366,3±193,0 1,06..4610	2,0±0,5 0,27..6,76	0,11..2,45	28	17,3
Zn	928±267 60..3135	1782±254 64..6632	3216±566 10,3..6454,6	846±327 0,6..40588,3	67±15 4..118,4	14211±3376 293..31290	3277±1138 25..23669	2..219,8	2641	16,1
As	1,2±0,3 0,6..38,5	0,9±0,03 0,6..1	0,9±0,12 0,05..1,91	0,4±0,07 0,07..12,96	0,3±0,07 0,06..0,63	1,5±0,42 0,3..4,93	0,6±0,09 0,032..6,893	0,196..0,3	0,8	4,2
Br	5,1±0,7 0,3..16,5	8,9±0,9 2,3..21	4,6±0,38 2,5..8,6	4,4±0,27 1..7	5,8±0,6 3,9..7,7	5,4±1,5 1..16,8	8,8±1,7 1,65..29,08	2,06..2,35	6,2	18,7
Rb	1,9±0,24 1..7	2,1±0,22 1..8	0,5±0,15 0,1..2,9	0,6±0,09 0,16..2,64	0,6±0,25 0,08..2,25	1,5±0,57 0,4..4,8	1,2±0,35 0,34..4,6	0,4	1,3	5,4
Sr	6561±981 1934..12851	4719±1453 667..10734	3088±376 668..5318	2849±519 20..13824	13476±2551 3336..25683	464±190 20..1653	3705±837 60..10724	703..1066	4187	1642
Ag	0,3±0,04 0,1..11,4	0,5±0,08 0,1..3,1	0,1±0,003 0,1..0,17	0,5±0,02 0,05..0,5	0,6±0,29 0,1..2,6	1,1±0,6 0,16..60,6	0,7±0,22 0,17..3,25	0,3..56,67	0,5	0,07
Sb	0,13±0,03 0,05..0,63	0,24±0,06 0,05..1,87	0,07±0,01 0,002..0,23	0,18±0,06 0,002..1,322	0,03±0,01 0,001..0,094	1,8±0,77 0,025..45,17	0,1±0,02 0,011..1,253	0,044..0,07	0,3	0,44
Cs	0,08±0,005 0,05..0,1	0,1±0,01 0,05..0,4	0,009±0,003 0,001..0,042	0,02±0,006 0,001..0,17	0,06±0,03 0,01..1,21	0,02±0,008 0,008..0,29	0,05±0,02 0,008..0,251	0,008..0,136	0,05	0,4
Ba	238±34 30..988	414±36 173..952	67±3 42,6..84,8	79±8 26..245	203±47 86..499	2271±908 10..7652	71±17 4..245	286..456	354	200
La	0,5±0,09 0,02..1,55	0,4±0,07 0,02..1,53	0,4±0,04 0,15..0,85	0,9±0,08 0,25..1,86	2,2±0,9 0,64..8,3	5,4±1,26 2,18..38,49	1,9±0,39 0,14..6,16	0,12..0,52	1,12	1,9
Ce	3,1±0,38 0,11..8,09	4,1±0,37 1,37..9,12	1,7±0,16 0,64..3,2	2,4±0,23 0,1..4,9	5,1±1,0 1,9..26,1	14,9±3,5 5,4..71,45	27,9±6,4 1,76..83,43	0,12..0,35	6,5	5,1
Sm	0,02±0,005 0,01..0,16	0,08±0,02 0,01..0,53	0,03±0,009 0,006..0,149	0,03±0,009 0,001..0,217	0,09±0,03 0,006..0,292	0,46±0,15 0,009..1,534	0,11±0,03 0,009..0,743	0,04..0,047	0,08	0,15
Eu	0,01±0,001 0,01..0,033	0,02±0,004 0,01..0,1	0,009±0,001 0,001..0,02	0,008±0,002 0,001..0,044	0,008±0,001 0,001..0,014	0,1±0,04 0,004..0,918	0,02±0,004 0,003..0,054	0,005..0,01	0,02	0,008
Tb	0,03±0,001 0,02..0,03	0,02±0,002 0,02..0,09	0,02±0,001 0,014..0,04	0,01±0,002 0,001..0,054	0,02±0,004 0,005..0,037	0,007±0,0005 0,005..0,009	0,02±0,005 0,001..0,013	0,008..0,009	0,02	0,02
Yb	0,05±0,000 4 0,05..0,06	0,06±0,005 0,05..0,19	0,03±0,007 0,003..0,139	0,03±0,006 0,009..0,123	0,03±0,005 0,009..0,051	0,44±0,14 0,009..1,328	0,04±0,01 0,001..0,902	0,009..0,04	0,07	0,14
Lu	0,01±0,002 0,001..0,05	0,02±0,002 0,001..0,05	0,02±0,002 0,006..0,049	0,03±0,002 0,002..0,056	0,06±0,01 0,012..0,119	0,08±0,03 0,002..0,263	0,03±0,009 0,005..0,237	0,006..0,073	0,03	0,02
Hf	0,03±0,007 0,01..0,143	0,06±0,02 0,01..0,56	0,04±0,01 0,01..0,18	0,03±0,006 0,002..0,125	0,05±0,01 0,009..0,118	0,3±0,09 0,009..3,275	0,06±0,01 0,001..0,324	0,01..0,087	0,06	0,17
Ta	0,07±0,008 0,05..0,27	0,08±0,008 0,05..1,1	0,01±0,003 0,01..0,06	0,02±0,005 0,003..0,159	0,01±0,003 0,01..0,035	0,02±0,009 0,01..5,993	0,015±0,004 0,01..0,172	0,01	0,04	0,014
Au	0,04±0,02 0,001..0,375	0,008±0,001 0,001..0,031	0,002±0,0004 0,001..0,121	0,005±0,0003 0,004..0,014	0,004±0,0005 0,002..0,005	0,005±0,001 0,001..0,011	0,005±0,003 0,0003..0,04	0,0043..7,438	0,01	0,16
Th	0,05±0,01 0,02..0,352	0,08±0,02 0,005..0,35	0,04±0,01 0,01..0,21	0,04±0,01 0,001..0,281	0,08±0,03 0,02..0,231	0,46±0,07 0,165..4,016	0,23±0,06 0,01..0,616	0,01	0,1	0,4
U	9,6±1,35 2,3..32,91	10,2±0,99 1,8..22,5	4,4±0,4 1,6..8,9	6,5±0,7 1,2..14,8	13,3±3,3 2,6..93,2	30,0±10,6 0,816..119,9	95±24 10..305,2	0,05..0,615	14	4,5
Th/U	0,005	0,008	0,009	0,006	0,006	0,015	0,002	–	0,007	0,09
La/Ce	0,18	0,11	0,22	0,36	0,43	0,36	0,07	–	0,17	0,37
La+Ce/Yb+Lu	57	56	39	55	81	39	426	–	76	44
Na/Br	78	34	15	29	89	333	34	–	74	695
Ba/Sr	0,03	0,09	0,02	0,03	0,02	4,9	0,02	–	0,08	0,12
Fe/Zn	1,3	0,8	0,4	2,0	31,3	0,6	0,7	–	0,8	93
U/ΣREE	2,6	2,2	2,0	1,9	1,8	1,4	3,2	–	1,8	0,6

Примечание: в скобках – количество проб; числитель – среднее содержание ± ошибка, знаменатель – минимальное и максимальное содержание, жирным выделены максимальные средние значения.

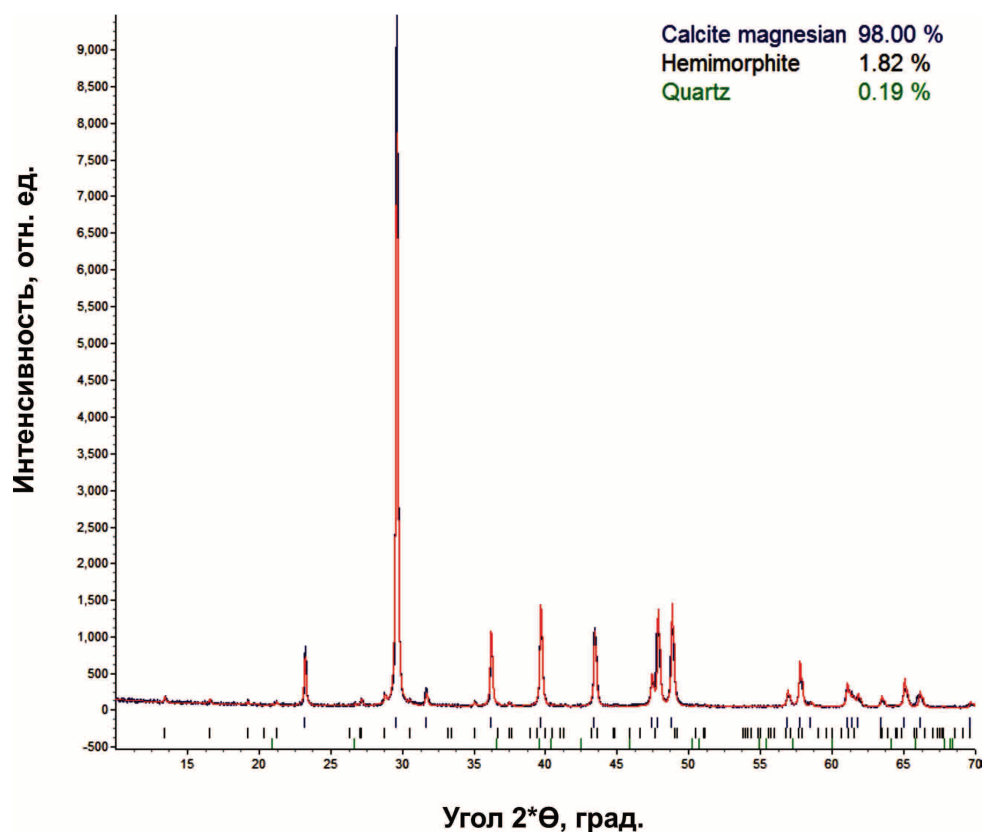


Рис. 5. Дифрактограмма образца накипи с содержанием Zn 2,4 %

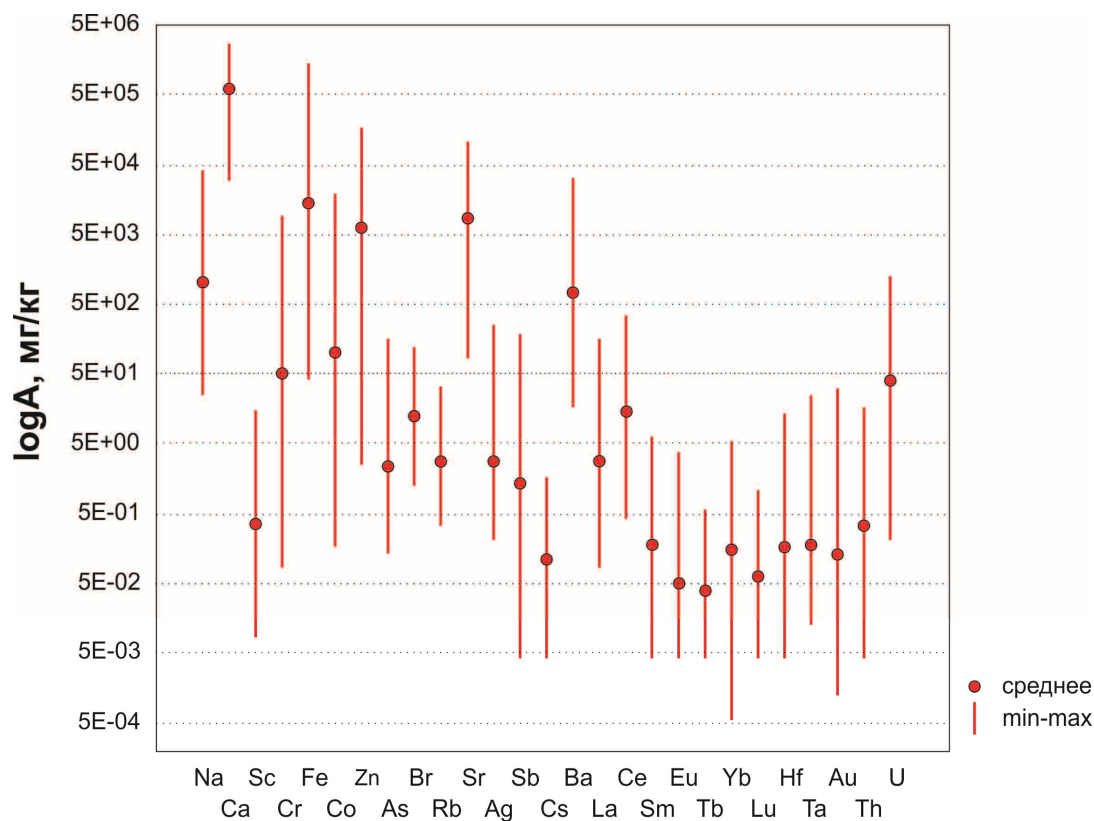


Рис. 6. Интервал разброса и среднее содержание химических элементов в солевых отложениях питьевых вод Байкальского региона, мг/кг

В образцах с высоким содержанием отдельных элементов, например, цинка на уровне 0,5 % и выше, нами с использованием метода рентгеновской дифрактометрии фиксировались отдельные минеральные фазы этих элементов, например гемиморфит ($Zn_4[Si_2O_7](OH)_2 \cdot H_2O$) – водосодержащий силикат цинка островной структуры (рис. 5).

Оценочные уровни накопления изученных элементов в солевых отложениях питьевых вод на территории изученных районов приведены в табл. 3 и отражены на рис. 6.

Анализ этих материалов показывает, что все определяемые элементы разделяются на несколько групп по диапазону содержания: Cr, Fe, Zn, Sb – 6 порядков в значениях; Sc, La, Yb, Au, Th – 5 порядков; Na, As, Sr, Ag, Cs, Ba, Ce, Sm, Eu, Ta, U – 4 порядка; Ca, Br, Rb, Tb, Lu – 3 порядка. Столь широкий разброс содержаний химических элементов, скорее всего, объясняется особенностями геологического строения территорий.

Ведущую группу элементов, минимальные концентрации которых превышают единицы и десятки мг/кг, составляют Na, Ca, Fe, Zn, Sr, Ba. Первые три элемента являются структурообразующими для минералов солевых отложений питьевых вод. Присутствие Zn, Sr, Ba, видимо, обусловлено близкими геохимическими свойствами, позволяющими замещать ионы Na, Ca, Fe в структуре арагонита/кальцита, слагающих основную матрицу минералов накипи.

Для выявления связей между элементами нами были рассчитаны коэффициенты парной и множественной корреляции для всей выборки (N=152).

Проведенный кластерный анализ всей выборки позволил выделить ассоциации химических элементов и характер их накопления (рис. 7). Дендрограмма показала, что существует несколько групп элементов, образующих значимые ассоциации: 1 –

уран, церий, тербий, бром; 2 – сурьма, мышьяк; 3 – цезий, рубидий; 4 – стронций, кальций; 5 – лутеций, иттербий, цинк; 6 – самарий, серебро, европий, лантан, скандий; 7 – торий, кобальт, железо, хром; 8 – барий, тантал, гафний, натрий.

По данным корреляционного анализа видно, что наиболее сильная положительная корреляционная связь отмечается для пары Fe-Co (0,96), а наиболее сильная отрицательная – для пары Ca-Zn (–0,6). Обращают на себя внимание следующие особенности парной корреляции элементов:

- отрицательная корреляционная связь Ca со всеми элементами (кроме Sr), что, по-видимому, указывает на его независимое поступление в накипь;
- антагонизм Ca к макроэлементам: Na, Sc, Cr, Fe, Co, Zn, Ba (0,34–0,6, вероятность 99 %), что находит свое отражение в минералогическом составе солевых отложений: вероятно, с данным случае имеет место замещение атомов кальция в структуре накипи и образование собственных минеральных форм этих элементов (оксидов, гидроксидов, карбонатов, силикатов, сульфатов);
- находит свое подтверждение геохимия элементов группы железа (Cr, Fe, Co, Zn);
- Sr имеет отрицательную связь со всеми элементами, кроме Na, Ca, Cr, Cs;
- связь целого ряда микроэлементов (Ag, La, Sm, Eu, Yb, Hf, Th) с макроэлементами (Na, Sc, Cr, Fe, Co, Zn) на уровне 0,3–0,9 с вероятностью 99 % (табл. 4).

Геохимические особенности солевых отложений

питьевых вод в районах со слабой техногенной нагрузкой

Анализ табл. 4 показывает, что для каждой территории наблюдается своя геохимическая специализация.

Таблица 4. Связи химических элементов в солевых отложениях питьевых вод Байкальского региона

Na	Ca	Sc	Cr	Fe	Co	Zn	As	Br	Rb	Sr	Ag	Sb	Cs	Ba	La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	Hf	Ta	Au	Th	U	
1	0,44	0,42	0,35	0,54	0,48	0,15	0,03	0,08	0,07	0,15	0,16	0,29	0,21	0,38	0,34	0,13	0,53	0,28	0,09	0,35	0,19	0,59	0,52	0,03	0,63	0,00	Na
	1	0,55	0,47	0,57	0,52	0,60	0,18	0,07	0,11	0,17	0,37	0,11	0,22	0,34	0,56	0,34	0,48	0,49	0,24	0,48	0,28	0,42	0,24	0,02	0,58	0,19	Ca
		1	0,63	0,65	0,50	0,51	0,12	0,12	0,15	0,20	0,88	0,23	0,10	0,28	0,94	0,40	0,85	0,94	0,04	0,77	0,51	0,48	0,27	0,01	0,64	0,04	Sc
			1	0,84	0,84	0,33	0,02	0,13	0,05	0,08	0,61	0,01	0,05	0,27	0,58	0,23	0,56	0,51	0,06	0,34	0,22	0,29	0,06	0,01	0,69	0,05	Cr
				1	0,96	0,37	0,01	0,19	0,05	0,15	0,50	0,17	0,05	0,40	0,61	0,21	0,70	0,53	0,06	0,43	0,23	0,64	0,44	0,01	0,93	0,05	Fe
					1	0,31	0,01	0,18	0,07	0,15	0,36	0,10	0,07	0,37	0,44	0,12	0,54	0,35	0,07	0,29	0,15	0,49	0,28	0,00	0,84	0,06	Co
						1	0,02	0,04	0,03	0,27	0,42	0,02	0,06	0,36	0,50	0,25	0,36	0,47	0,15	0,57	0,40	0,25	0,13	0,05	0,35	0,01	Zn
							1	0,33	0,01	0,17	0,12	0,24	0,08	0,06	0,16	0,19	0,03	0,11	0,21	0,10	0,03	0,01	0,03	0,18	0,01	0,16	As
								1	0,05	0,09	0,10	0,03	0,06	0,02	0,05	0,52	0,23	0,13	0,46	0,13	0,15	0,04	0,05	0,17	0,13	0,59	Br
									1	0,12	0,04	0,02	0,62	0,21	0,02	0,07	0,18	0,07	0,06	0,02	0,06	0,07	0,04	0,06	0,12	0,08	Rb
										1	0,09	0,15	0,19	0,13	0,17	0,16	0,12	0,16	0,08	0,24	0,02	0,15	0,09	0,09	0,19	0,10	Sr
											1	0,02	0,03	0,09	0,88	0,42	0,68	0,89	0,03	0,57	0,41	0,18	0,01	0,02	0,36	0,02	Ag
												1	0,05	0,12	0,17	0,03	0,28	0,11	0,09	0,30	0,08	0,38	0,40	0,01	0,31	0,01	Sb
													1	0,26	0,02	0,10	0,12	0,04	0,03	0,02	0,09	0,04	0,03	0,03	0,07	0,09	Cs
														1	0,24	0,11	0,30	0,22	0,09	0,23	0,03	0,48	0,35	0,02	0,48	0,01	Ba
															1	0,55	0,81	0,95	0,01	0,77	0,55	0,48	0,29	0,03	0,58	0,13	La
																1	0,32	0,41	0,38	0,26	0,12	0,20	0,11	0,08	0,21	0,87	Ce
																	1	0,78	0,07	0,65	0,50	0,65	0,49	0,02	0,75	0,06	Sm
																		1	0,06	0,80	0,57	0,48	0,30	0,02	0,52	0,03	Eu
																			1	0,03	0,01	0,01	0,02	0,22	0,08	0,44	Tb
																				1	0,80	0,51	0,39	0,01	0,51	0,07	Yb
																					1	0,24	0,17	0,07	0,26	0,14	Lu
																						1	0,94	0,05	0,81	0,03	Hf
																							1	0,05	0,64	0,03	Ta
																								1	0,01	0,09	Au
																									1	0,02	Th

Примечание: красным цветом выделена отрицательная корреляционная связь; выделены значимые корреляционные связи химических элементов: полужирным шрифтом – на уровне вероятности 95 %, полужирным курсивом – на уровне вероятности 99 %.

Примечание: красным цветом выделена отрицательная корреляционная связь; выделены значимые корреляционные связи химических элементов: полужирным шрифтом – на уровне вероятности 95 %, полужирным курсивом – на уровне вероятности 99 %.

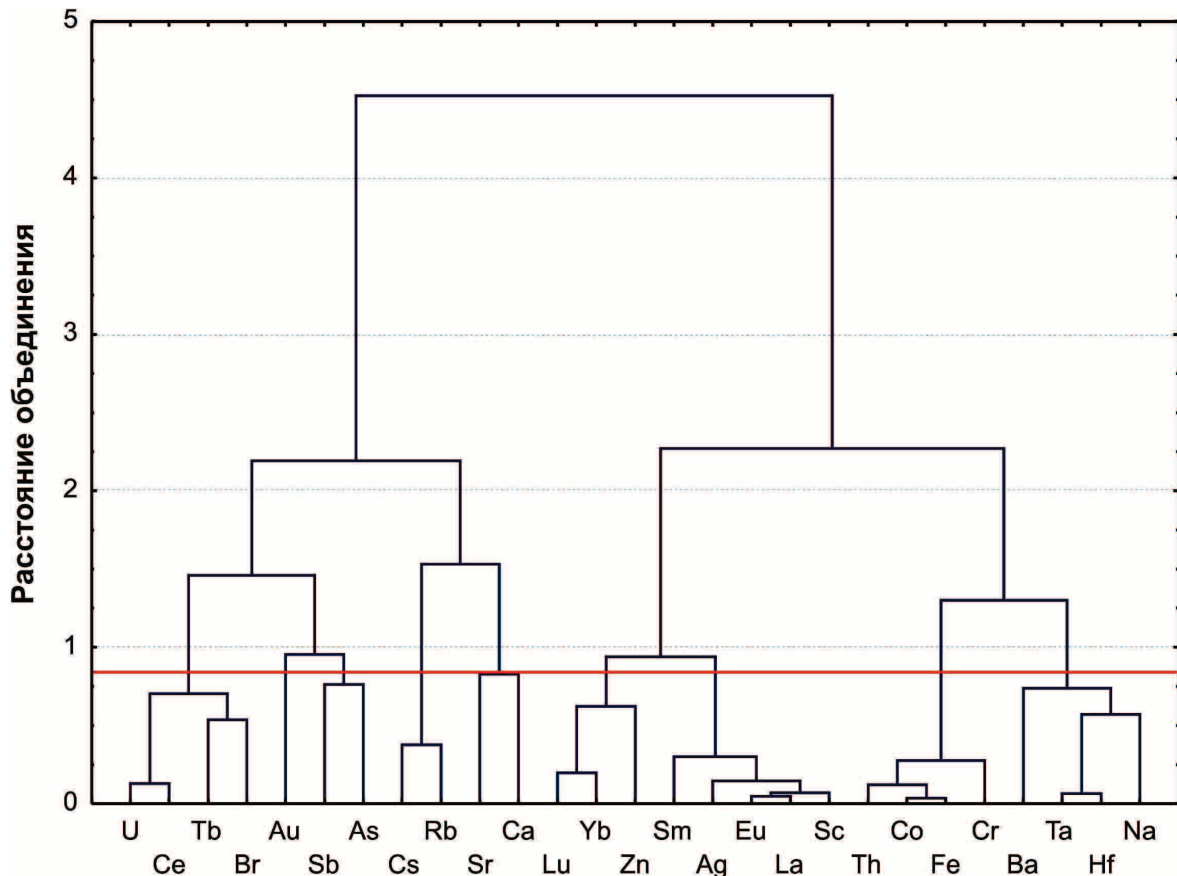


Рис. 7. Дендрограмма корреляционной матрицы геохимического спектра элементов в солевых отложениях питьевых вод Байкальского региона (1-Pearson $r(0,05)=0,84$; объем выборки – 152 пробы)

Для Боханского района Иркутской области характерны наиболее высокие средние значения концентрации Ca, Tb, Au. Здесь отмечается чрезвычайно интересная As-Ag-Au специализация, которая требует дальнейших детальных исследований. Накипь из населенных пунктов находящегося рядом Осинского района выделяется максимальным накоплением 4 элементов: Br, Rb, Cs, Ta. Если первые три элемента можно объяснить с геологической точки зрения наличием на глубине кембрийских соленосных и гипсоносных толщ, вмещающих проявления нефти (отсюда и Br), и наличием рассолов, то природа Ta абсолютно непонятна, например, в с. Ново-Ленино, где в солевых отложениях наблюдается концентрация Ta – 1,1 мг/кг, что выше его кларка для гранитов [21].

В целом на правобережье р. Ангара отмечаются более высокие концентрации большинства элементов в накипи по сравнению с левобережьем, где наблюдаются наиболее низкие региональные показатели накопления химических элементов в данной среде. Видимо, это обусловлено как особенностями геологического строения – изученные районы расположены в области так называемого Присяянского прогиба, выполненного преимущественно юрскими угленосными отложениями, – так и преимущественно сельскохозяйственной специализацией района, что ведет к отсутствию сильной техно-

ногенной нагрузки на гидросферу. Для данной территории исследования характерно наименьшее количество элементов (8) с коэффициентом концентрации больше 1 относительно солевых отложений из вод оз. Байкала, которые для данного региона могут быть приняты за фоновое значение.

Такой же слабо техногенно трансформированной территорией является Тункинская котловина, которая также является районом с преимущественно сельскохозяйственной специализацией, более того, весь Тункинский район находится в пределах одноименного национального природного парка, где ограничена хозяйственная деятельность человека. Однако для накипи из п. Жемчуг, расположенного в этом районе, нами зафиксирована геохимическая специализация на Ag и Au, концентрации которых достигают в отдельных пробах 57 и 7,4 мг/кг, соответственно. Специализация на эти же элементы нами выявлена и для травертинов, формирующихся на самоизливающейся скважине Г-1 (углекислая), которая функционирует в этом месте: Ag – 174 мг/кг, Au – 8,3 мг/кг. Детальными минералогическими исследованиями с использованием электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп Hitachi 3400N с энергодисперсионной приставкой фирмы Bruker, лаборатория электронно-оптической диагностики Международного инновационного научно-образова-

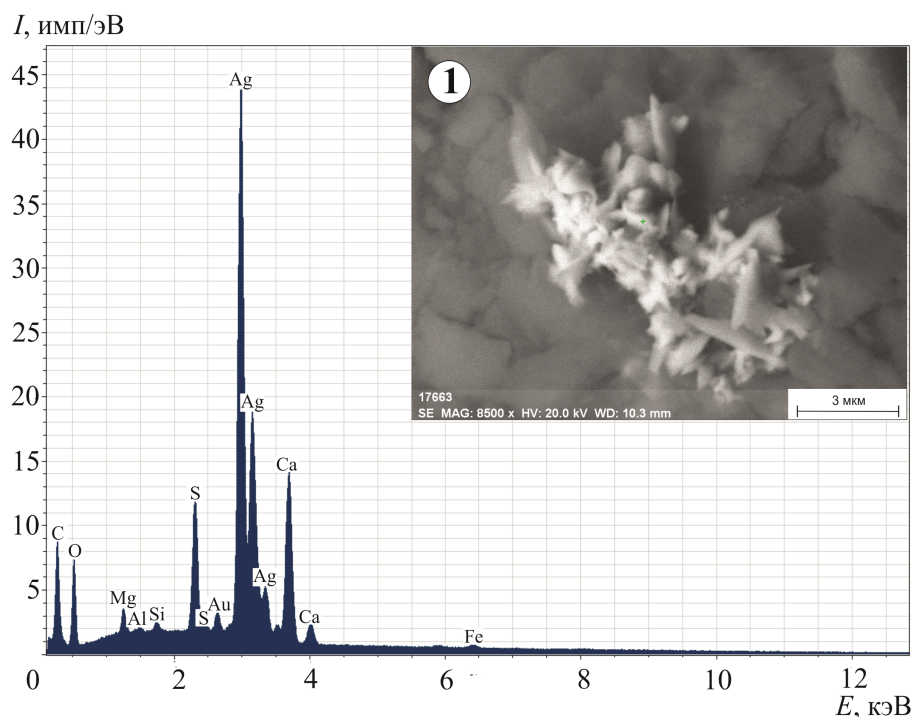


Рис. 8. Общий вид и энергодисперсионный спектр аргентита в образце накипи

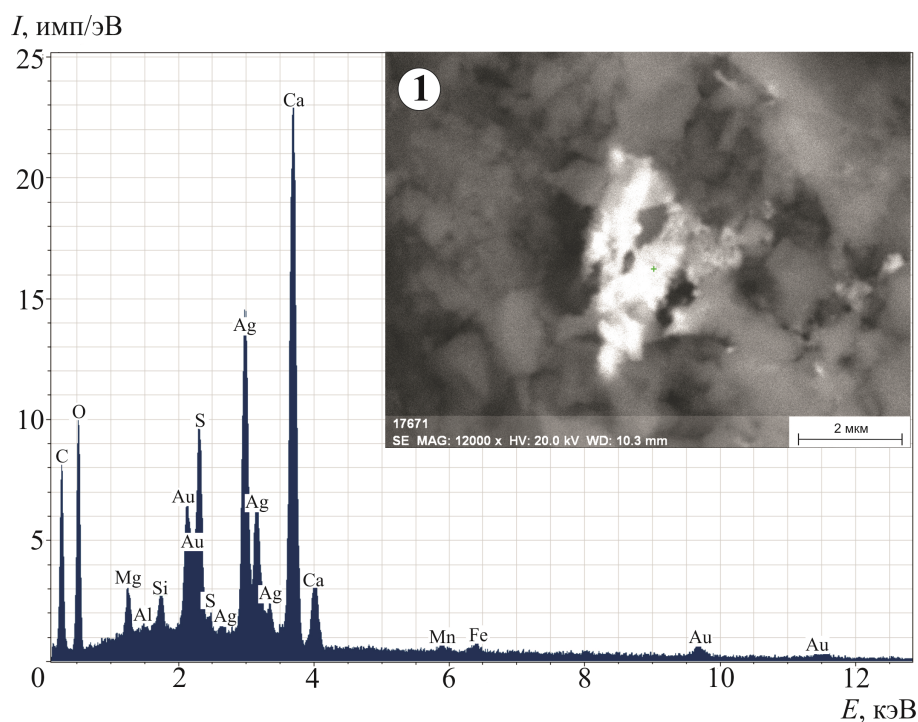


Рис. 9. Общий вид и энергодисперсионный спектр самородного золота с серебром в образце накипи

тельного центра «Урановая геология», аналитик – Ильенок С.С.) были обнаружены собственные минеральные формы этих элементов в виде самородного золота и аргентита как в накипи (рис. 8, 9), так и в травертинах [22].

По-видимому, это геохимическая специализация обусловлена функционированием современ-

ной гидротермальной системы в зоне Байкальского рифта (зона Тункинского разлома). Дальнейшие исследования на данной территории будут способствовать решению этой проблемы.

В аналогичной геолого-структурной позиции находится территория Усть-Баргузинской впадины, размещение которой контролируется Баргу-

зинским разломом – одной из крупнейших тектонических структур рифтовой зоны Байкала.

Накипь из населенных пунктов этого района характеризуется максимальным накоплением большинства (16 из 27) рассматриваемых элементов, в том числе: Na, Sc, Cr, Fe, Co, Zn, Ag, Sb, Ba, La, Sm, Eu, Yb, Lu, Hf, Th. Обращают на себя внимание высокие содержания в солевых отложениях Th, U, Hf, редких земель, а также аномальные концентрации Zn (в среднем 1,4 %), Co (в среднем 0,03 %), Ba (в среднем 0,02 %).

Специализацию на радиоактивные и редкоземельные элементы солевых отложений этого района можно объяснить тем, что питьевые воды, по видимому, формируются при участии химических элементов коры выветривания гранитоидов Баргузинского комплекса, обогащенного этими компонентами ($U > 10$ г/т, $Th > 30$ г/т). Природа Zn, Co и Ba является на данный момент невыясненной.

В качестве рабочей гипотезы можно предположить, что в данном случае имеет место разгрузка термальных вод из глубинных зон, поступающих по системам разрывных нарушений, и их последующее смешение с грунтовыми и поверхностными водами. Подтверждением этого могут служить геохимические данные по анализу большого количества минеральных источников Байкальской рифтовой зоны [2, 7]. В отдельных случаях, как например, в районе Кулиных болот на Баргузино-Чивыркуйском перешейке по существу дела формируется водородная геохимическая аномалия (U, Se, Mo и ряд других элементов) [23], что также подтверждается нашими исследованиями [24].

Ранее нами высказывалось, что элементный состав солевых отложений питьевых вод может быть использован для целей металлогенического прогнозирования. Так, в работе [18] показано, что пространственные ореолы накопления U в солевых отложениях питьевых вод могут свидетельствовать о перспективах выявления уранового оруденения, вероятно, инфильтрационного типа, а наличие Ag и Au позволяет утверждать о возможности выявления благороднометалльного оруденения, вероятно, типа кор выветривания. На территории Байкальского региона нами были исследованы два района: Боргойская впадина и пригород г. Улан-Удэ, в пределах которых, по нашему мнению, имеет место влияние природного фактора в виде геохимически специализированных комплексов горных пород на уран. Оба района выделяются аномальными концентрациями, прежде всего, U, достигающими в отдельных пробах 93 мг/кг (Боргойская впадина) и 305 мг/кг (пригород г. Улан-Удэ).

Как нам представляется, такие значения накопления U в накипи связаны с особенностями геологического строения. Например, в Боргойской впадине при бурении поисковых скважин были выявлены урановые рудопоявления (устное сообщение Д.А. Самовича, Байкальский филиал «Сосновгеология» ФГУП «Урангеологоразведка»), возможно, находящиеся на уровне водоносных горизонтов, откуда осуществляется водозабор.

В свою очередь, к территории пригорода г. Улан-Удэ с юго-востока пространственно тяготеют субщелочные граниты витимканского комплекса, которые находятся на Цаган-Дабанской площади, перспективной на выявление U-Мо минерализации: здесь известно Брянское месторождение Мо и ряд рудопоявлений U. К юго-западу от г. Улан-Удэ расположен Жарчихинский редкометальный рудный узел, приуроченный к сиенитам и щелочным гранитам куналейского комплекса. Зафиксированные концентрации U в этих местах – $(3...15) \cdot 10^{-4} \%$ и $(3...20) \cdot 10^{-4} \%$ соответственно [1].

Геохимические особенности солевых отложений питьевых вод в районах с сильной техногенной нагрузкой

Среди изученных районов по степени специфической техногенной нагрузки выделяются два. Это зона возможного влияния подземного ядерного взрыва (ПЯВ) «Рифт-3» и зона влияния хвостохранилища бывшего Джидинского вольфрамо-молибденового комбината (ДВМК).

ПЯВ «Рифт-3», проведенный 31 июля 1982 г. в верховьях р. Обуса на территории Осинского района Усть-Ордынского автономного округа, сопровождался разрывом сплошности геологических пластов, дроблением горных пород и прорывом глубинных напорных минерализованных вод в горизонт грунтовых питьевых вод. В результате произошло нарушение палеозойских карбонатных пород с залежами каменной соли, которые активно выщелачивались [25].

Факт возможного воздействия ПЯВ на гидросферу в целом подтверждается нами при изучении распределения редкоземельных и радиоактивных элементов в накипи. Образцы, отобранные в населенных пунктах, которые расположены вдоль р. Обуса, характеризуются наиболее высокими показателями концентрации Sm, Eu и Th (рис. 10) по сравнению с накипью из остальных населенных пунктов Прибайкалья. Также зона возможного влияния ПЯВ выделяется повышенным показателем Th/U отношения: в пределах Осинского района наблюдается разделение населенных пунктов на две группы по этому показателю: находящиеся в зоне ПЯВ и вне этой зоны. Особенно это касается населенных пунктов Горхон, Хандагай, Борохал, которые находятся в верховьях р. Обуса, ближе всего к эпицентру взрыва. Для них характерен повышенный показатель Th/U отношения (№ 1, 2, 3 на рис. 11).

Согласно ранее проведенным исследованиям [6], в накипи из населенных пунктов по р. Обуса наблюдаются комплексные геохимические аномалии. Например, для поселков Ново-Ленино, Обуса – U, Th, Ce, Sc, Br, Sr, также здесь наблюдается наиболее высокие значения $La+Ce/Yb+Lu$, Ce/Eu отношений. В данном случае, как предполагают авторы, возможно поступление минерализованных вод из пород эвапоритовой формации кембрия, в пределах которых осуществлялся ПЯВ.

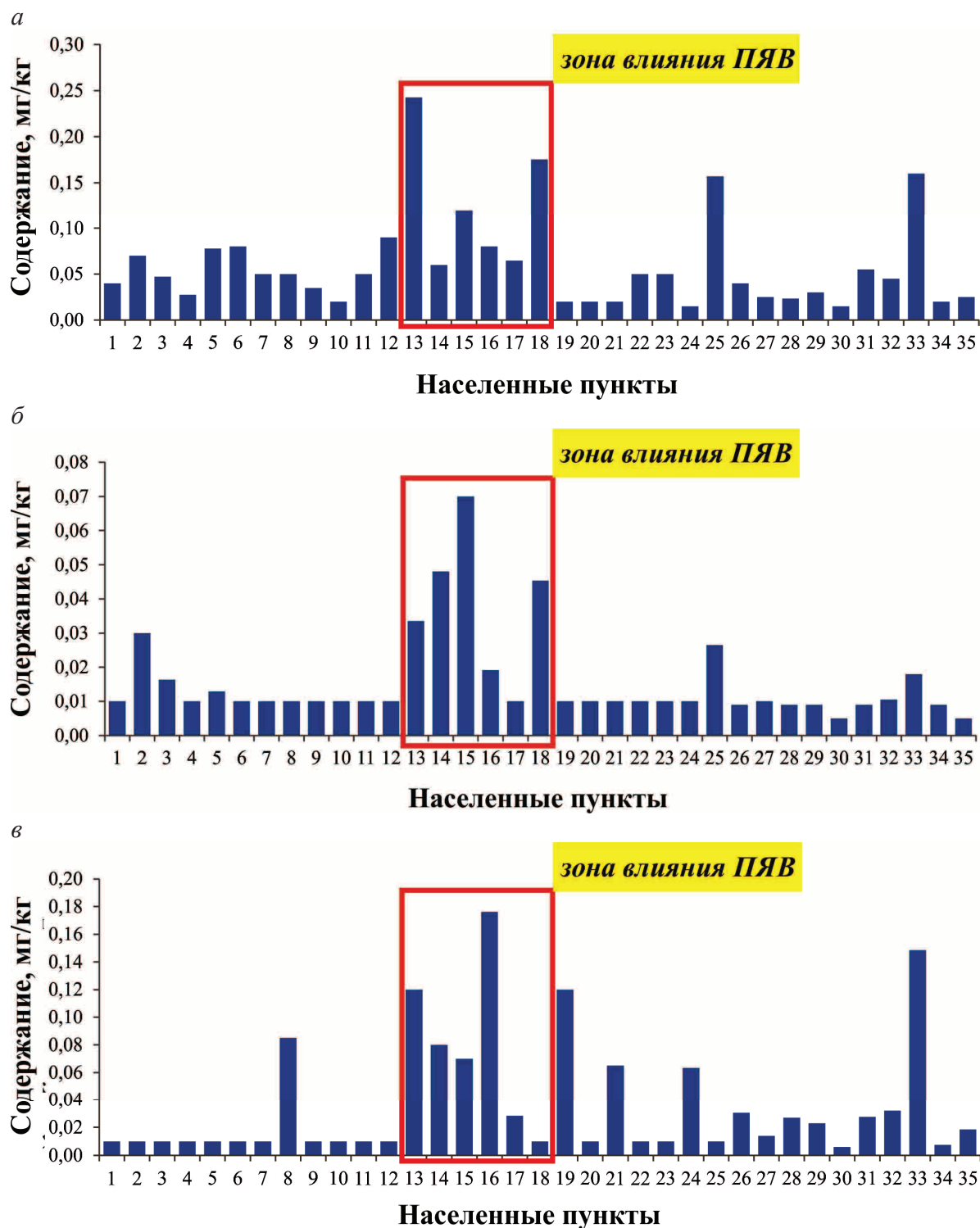


Рис. 10. Распределение Sm (а), Eu (б), Th (в) в накипи по населенным пунктам Прибайкалья. Населенные пункты: 1 – Тихоновка; 2 – Укыр; 3 – Хохорск; 4 – Шунта; 5 – Бохан; 6 – Заглик; 7 – Усть-Тараса; 8 – Тараса; 9 – Новая Ида; 10 – Улей; 11 – Буреть; 12 – Александровский; 13 – Хандагай; 14 – Борохал; 15 – Горхон; 16 – Обуса; 17 – Ново-Ленино; 18 – Кутанка; 19 – Шотой; 20 – Онгосор; 21 – Оса; 22 – Майск; 23 – Ирхидей; 24 – Хокта; 25 – Онгой; 26 – Балаганск; 27 – Новонукутский; 28 – Коновалово; 29 – Новоленино; 30 – Наймодай; 31 – Первомайск; 32 – Зунгар; 33 – Куйта; 34 – Зоны; 35 – Кутулик

По этим же данным непосредственно вблизи ПЯВ в населенных пунктах Борохал и Горхон фиксируются повышенные концентрации U, Th, некоторых редкоземельных элементов, Sc, Zn. Обраща-

ет на себя внимание увеличение концентрации некоторых редких земель в накипи из населенных пунктов по мере приближения к месту проведения взрыва.

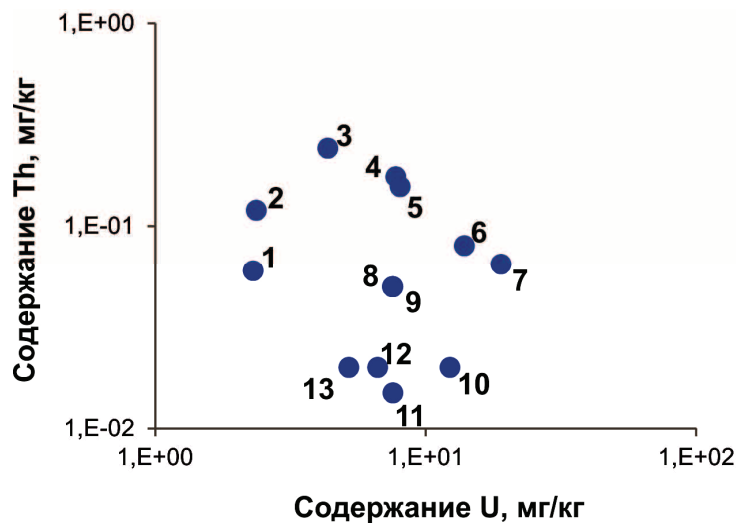


Рис. 11. Радиогеохимическая типизация солевых отложений питьевых вод Осинского района (Иркутская область). Населенные пункты: 1 – Борохал; 2 – Горхон; 3 – Хандагай; 4 – Кутанка; 5 – Онгой; 6 – Ново-Ленино; 7 – Обуса; 8 – Ирхидей; 9 – Майск; 10 – Оса; 11 – Хокта; 12 – Шотой; 13 – Онгосор

Для более точного определения индикаторов ПЯВ необходимо проведение изотопных исследований.

Хвостохранилища бывшего ДВМК являются основным загрязнителем территории г. Закаменск на протяжении более чем 70 лет. Проблема усугубляется тем, что они не были рекультивированы, и с их поверхности наблюдается ветровой и водный перенос материала. Согласно результатам эколого-геохимических исследований, проводившихся на территории г. Закаменска в 2004–2005 гг. поверхностные воды сильно загрязнены шахтными и инфильтрационными водами, поступающими из отработанных штолен и хвостохранилищ. Зафиксированы превышения ПДК по свинцу, кадмию, ряду других элементов. Загрязнение поверхностных вод влечет за собой возможность загрязнения Модонкульского месторождения подземных вод, из которого ведется забор питьевой воды для местного населения, поскольку по мощности зоны аэрации (2–3 м) и ее литологическому составу (галлика, гравий, песок) водоносный горизонт не защищен от загрязнения.

Качество питьевых вод, согласно результатам изучения накали питьевых вод низкое и по ряду компонентов (Zn, Sr, Ta, Au, U) превышает фоновые значения и, по-видимому, отражает влияние хвостохранилищ и шахт на поверхностную гидросферу. К сожалению, применяемый нами метод определения элементов – ИНАА – не позволяет определить приоритетные в данном случае тяжелые металлы (Pb, Cd, Hg, F, Ni, Mo, Cu, W), что требует также дополнительного исследования солевых отложений на эти компоненты другим аналитическим методом, например масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS).

Основываясь на вышеизложенном, можно отметить следующее: техногенез в изученных районах влияет на относительно небольшие территории и слабо проявлен на фоне природных факторов.

Типизация солевых отложений питьевых вод

Представленные данные по геохимическим особенностям солевых отложений питьевых вод на территории Байкальского региона показывают, что наблюдается дифференциация территорий как по уровням накопления, так и ассоциациям элементов; это позволяет наметить для выделения геохимические типы солевых отложений питьевых вод. Нормирование средних содержаний относительно фоновых показателей, в данном случае солевых отложений из вод оз. Байкал, позволяет определить геохимическую специализацию накали в изученных районах (табл. 6).

Таблица 6. Геохимическая специализация солевых отложений в изученных районах (относительно солевых отложений из вод оз. Байкал)

Район исследования	Геохимический ряд
Усть-Баргузинская впадина (18)	$Zn_{882,7}-Co_{21,2}-Ag_{15,7}-Eu_{12,5}-Ba_{11,4}-U_{6,7}-Fe_{5,5}-Sb_{4,1}-Lu_{4,0}-Sm=Yb_{3,1}-Ce_{2,9}-La_{2,8}-Cr=Hf_{1,8}-Ta_{1,4}-Sc_{1,3}-Th_{1,2}$
Боргойская впадина (11)	$Ag_{8,6}-Sr_{8,2}-Zn_{4,2}-Lu=U_{3,0}-Fe_{1,4}-La_{1,2}-Ce=Ba=Ca=Eu_{1,0}$
Пригород г. Улан-Удэ (11)	$Zn_{203,5}-U_{21,1}-Ag_{9,3}-Ce_{5,5}-Sr_{2,3}-Eu_{1,9}-Fe=Lu_{1,5}-Ta_{1,1}-La_{1,0}=Tb_{1,0}$
Осинский район (10)	$Zn_{110,7}-Ag_{7,1}-Ta_{5,7}-Sr_{2,9}-Eu_{2,5}-U_{2,3}-Ba_{2,1}-Ca_{1,4}-Lu=Tb_{1,0}$
Боханский район (9)	$Zn_{57,6}-Ta_{5,0}-Ag_{4,3}-Sr_{4,0}-U_{2,1}-Tb=Ca_{1,5}-Eu_{1,3}-Ba_{1,2}$
Закаменский район (9)	$Zn_{52,5}-Ag_{6,7}-Sr_{1,7}-Lu_{1,5}-Ta=U_{1,4}-Fe=Ca_{1,1}-Eu_{1,0}$
Левобережье р. Ангара (8)	$Zn_{199,8}-Sr_{1,9}-Ag_{1,4}-Lu_{1,2}-Eu=Ca_{1,1}-U=Tb_{1,0}$
Тункинская котловина (7)	$Ag_{406,9}-Au_{23,3}-Zn_{13,7}-Fe_{5,5}-Sr_{3,5}-Lu_{2,0}-Ba_{1,9}$

Примечание: в скобках указано количество элементов, коэффициент концентрации (КК) которых больше 1; жирным выделены элементы, превышающие КК=2.

Нами предварительно выделены следующие геохимические типы солевых отложений питьевых вод (накипи):

1. «Баргузинский» тип накипи с ассоциацией редких, редкоземельных и радиоактивных элементов, видимо, отражающий влияние процессов рифтогенеза на гидросферу.
2. Тип накипи, связанный со степными и лесостепными ландшафтами Забайкалья, которые характеризуются развитием локальных скоплений U в осадочных породах межгорных впадин (Боргойская впадина и район г. Улан-Удэ). Типичной ассоциацией в этом случае является U-REE. В накипи из Боргойской впадины геохимический ряд начинается с Ag, тогда как во всех других, за исключением минеральных образований из (пока слабо изученной) Тункинской котловины, он начинается с Zn.
3. Прибайкальский платформенный тип, который мало специализирован и отмечается ассоциацией Ta-Sr-Ag, иногда с Ba; к этому типу можно отнести накипь из населенных пунктов правобережья р. Ангара.
4. Вероятно, нами будет выделен особый «тункинский» тип солевых отложений, специализированный на Au и Ag, исследование которого продолжается в настоящее время.

5. Условно фоновый тип накипи может быть выделен для левобережья р. Ангара, где превышения относительно фона наблюдаются лишь для Zn, который можно принять за типоморфный сквозной элемент для солевых отложений питьевых вод всего Байкальского региона.

Заключение

В работе были рассмотрены геохимические особенности накипи питьевых вод на территории семи районов Байкальского региона, характеризующиеся различными природными и техногенными условиями. Для каждого района были определены специфические элементы. Сделана попытка выделения геохимических типов изученных солевых отложений.

По результатам работы сделан вывод о возможности использования солевых отложений, формирующихся в бытовой теплообменной аппаратуре, для решения таких вопросов, как оценка качества вод, используемых для питьевого водоснабжения, эколого-геохимическая оценка состояния территории в комплексе с данными по другим природным средам и для целей металлогенического прогнозирования по геохимическим показателям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Региональная геохимия окружающей среды Байкальского региона / В.И. Гребенщикова, Э.Е. Лустенберг, Н.А. Китаев, И.С. Ломоносов. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2008. – 232 с.
2. Ломоносов И.С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. – Новосибирск: Наука, 1974. – 168 с.
3. Гидрогеология Прибайкалья / Е.В. Пиннекер [и др.]. – М.: Наука, 1968. – 171 с.
4. Пиннекер Е.В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна. Закономерности размещения, состав, динамика формирования и использование. – М.: Наука, 1966. – 332 с.
5. Пиннекер Е.В., Шенькман Б.М. Техногенное изменение гидрогеохимической обстановки в Ангаро-Ленском артезианском бассейне // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 1995. – № 1. – С. 110–122.
6. Geochemical specialization of limescale of water sources illustrated by two regions in Siberia / A.E. Taphaeva, T.T. Taisaev, L.P. Rikhvanov, E.G. Yazikov, N.V. Baranovskaya // Contemporary Problems of Ecology. – 2010. – V. 3. – № 4. – P. 498–507.
7. Особенности формирования травертинов из углекислых и азотных термальных вод в зоне Байкальского рифта / А.М. Плюсин, А.П. Суздальницкий, А.А. Адушинов, А.Г. Миронов // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41. – № 4. – С. 564–570.
8. Экологическое зонирование и статистические параметры экологически опасных зон города Закаменска (Республика Бурятия) / А.И. Куликов, А.П. Мангатаев, М.А. Куликов, Г.Г. Хамнаева, А.М. Плюсин // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2012. – № 3 (38). – С. 221–227.
9. Перязева Е.Г., Плюсин А.М. Взаимодействие атмосферных осадков с почвогрунтами урбанизированных территорий Байкальского региона. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2007. – 164 с.
10. Геохимическая деятельность микроорганизмов гидротерм Байкальской рифтовой зоны / Б.Б. Намсараев, Д.Д. Бархутова, Э.В. Данилова [и др.]. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2011. – 302 с.
11. Большая Советская Энциклопедия. 2013. URL: <http://www.bse-sci-lib.com> (дата обращения: 15.03.2013).
12. Эколого-геохимические особенности природных сред Томского района и заболеваемость населения / Л.П. Рихванов, Е.Г. Язиков, Ю.И. Сухих [и др.]. – Томск: Курсив, 2006. – 216 с.
13. Способ определения участков загрязнения ураном окружающей среды: пат. 2298212 Рос. Федерация. № 2005120840; заявл. 04.07.05; опубл. 27.04.07, Бюл. № 12. – 6 с.
14. Язиков Е.Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. – Томск, 2006. – 47 с.
15. Язиков Е.Г., Рихванов Л.П., Барановская Н.В. Индикаторная роль солевых образований в воде при геохимическом мониторинге // Известия вузов. Геология и разведка. – 2004. – № 1. – С. 67–69.
16. Монголина Т.А., Барановская Н.В., Соктоев Б.Р. Элементный состав солевых отложений питьевых вод Томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 204–211.
17. Язиков Е.Г., Барановская Н.В., Рихванов Л.П. Использование солевых образований (накипи) для целей геохимического районирования территорий // Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых: матер. Междунар. науч. конф., посвящ. столетию со дня рождения акад. К.И. Лукашева. – Минск, 14–16 марта 2007. – С. 252–254.
18. Монголина Т.А. Геохимические особенности солевых отложений (накипи) питьевых вод как индикатор природно-техногенного состояния территории: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2011. – 21 с.
19. Барановская Н.В. Закономерности накопления и распределения химических элементов в организмах природных и природ-

- но-антропогенных экосистем: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Томск, 2011. – 46 с.
20. Геохимический анализ подземных вод и биосред в долинах рек Обусы, Осы и Иды / А.Э. Тапхаева, Т.Т. Тайсаев, Л.П. Рихванов, Е.Г. Язиков, Н.В. Барановская // Вестник Бурятского государственного университета. – 2011. – Вып. 4: Биология, география. – С. 11–21.
 21. Геохимические особенности травертинов различных регионов и их прогнозное значение / Л.П. Рихванов, Т.Т. Тайсаев, Н.В. Барановская, Б.Р. Соктоев, Т.А. Монголина, А.Ф. Судыко, С.С. Ильенко // Современные проблемы геохимии: Матер. Всеросс. совещания (с участием иностранных ученых). – Иркутск, 2012. – Т. 1. – С. 233–236.
 22. Брюханова Н.Н. Геохимия серы, селена, теллура и сопутствующих элементов в кайнозойских отложениях Байкальской рифтовой зоны: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Иркутск, 2007. – 21 с.
 23. Новые данные о радиогеохимических особенностях природных сред Баргузино-Чивыркуйского перешейка (оз. Байкал) и Тункинской котловины / Л.П. Рихванов, Т.Т. Тайсаев, Н.В. Барановская, Б.Р. Соктоев, Т.А. Перминова // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Матер. IV Междунар. конф. – Томск, 4–8 июня 2013. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 441–444.
 24. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–571.
 25. Радиационное воздействие подземного ядерного взрыва «Рифт-3» на территорию и население Осинского района Иркутской области / В.И. Медведев, Л.Г. Коршунов, В.В. Коваленко [и др.] // Сибирский экологический журнал. – 2005. – № 6. – С. 1073–1078.

Поступила 17.10.2013 г.

UDC 556.114.6(571.53)

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF DRINKING WATER SALT DEPOSITS OF BAIKAL REGION

Bulat R. Soktoev,

Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk,
Lenin Avenue. E-mail: bulatsoktoev@gmail.com

Leonid P. Rikhvanov,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: rikhvanov@tpu.ru

Trofim T. Taisaev,

Dr. Sc., Buryat State University, Russia, 670000, the Buryat Republic,
Ulan-Ude, Smolina street, 24a. E-mail: taisaev@bsu.ru

Natalia V. Baranovskaya,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: natalia.baranovs@mail.ru

The urgency of the discussed issue is conditioned by the insufficient knowledge of the research object and the possibility of its application in environmental and geochemical investigations.

The main aim of the study is to estimate the content of 27 chemical elements including rare, rare-earth and radioactive elements and to identify their indicative significance in drinking water salt deposits (limescale), formed at multiple boiling and cooling in heat-exchanging equipment, on the territory of Baikal region.

The methods used in the study: method of instrumental neutron activation analysis (element composition analysis): X-ray diffractometry (DRON-3M, D8 Advance Bruker), electron microscopy (substantial analysis).

The results: Based on large bulk of data it was shown that element composition of salt deposits reflects the features of influence of natural and anthropogenic factors on formation of chemical composition of water used in drinking water supply system. The authors have determined the specific nature of chemical elements accumulation in limescale in investigated areas conditioned by the features of geologic structure and the rate of anthropogenic pressure. The possible indicative associations of elements of rifting on the territory of Ust-Barguzin and Tunka depressions are detached. The authors determined the potential uranium-bearing areas in terms of the uranium accumulation levels in salt deposits and singled out the geochemical types of limescale in terms of accumulation levels of elements and their associations.

Key words:

Salt sediment (formation), limescale, geochemical specialization, typification, Baikal region, rifting, technogenesis, gold, silver, rare-earth elements, uranium.

REFERENCES

1. Grebenshchikova V.I., Lustenberg E.E., Kitaev N.A., Lomonosov I.S. *Regionalnaya geokhimiya okruzhayushchey sredy Baykalskogo regiona* [Regional environmental geochemistry of the Baikal Region]. Novosibirsk, Geo Publ., 2008. 232 p.
2. Lomonosov I.S. *Geokhimiya i formirovanie sovremennykh gidroterm Baykalskoy riftingovoy zony* [Geochemistry and formation of hydrothermal Baikal rift zone]. Novosibirsk, Geo Publ., 2008. 232 p.

- contemporary thermal springs in Baikal rift zone]. Novosibirsk, Nauka, 1974. 168 p.
3. Pinneker E.V. *Gidrogeologiya Pribaykalya* [Hydrogeology of the Baikal region]. Moscow, Nauka, 1968. 171 p.
 4. Pinneker E.V. *Rassoly Angaro-Lenskogo artezianskogo basseyna. Zakonomernosti razmeshcheniya, sostav, dinamika formirovaniya i ispolzovanie* [Brines of Angar-Lenskiy artesian basin. Regularities of distribution, composition, dynamics of formation and utilization]. Moscow, Nauka, 1966. 332 p.
 5. Pinneker E.V., Shenkman B.M. Tekhnogennoe izmenenie gidrogeokhimicheskoy obstanovki v Angaro-Lenskom artezianskom bassejne [Anthropogenic change of hydrogeochemical situation in Angar-Lenskiy artesian basin]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya – Environmental geoscience: engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 1995, no. 1, pp. 110–122.
 6. Tapkhaeva A.E., Taisaev T.T., Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Baranovskaya N.V. Geokhimicheskaya spetsializatsiya osadkov (nakipey) vodnykh istochnikov na primere dvukh regionov Sibiri [Geochemical specialization of limescale of water sources illustrated by two regions in Siberia]. *Contemporary Problems of Ecology*, 2010, vol. 3, no. 4, pp. 498–507.
 7. Plyusnin A.M., Suzdalnitskiy A.P., Adushinov A.A., Mironov A.G. Osobennosti formirovaniya travertinov iz uglekislykh i azotnykh termalnykh vod v zone Baykalskogo rifta [Peculiarities of travertines formation from carbon dioxide and nitric thermal waters in Baikal rift zone]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2000, vol. 41, no. 4, pp. 564–570.
 8. Kulikov A.I., Mangataev A.C., Kulikov M.A., Khamnaeva G.G., Plyusnin A.M. Ekologicheskoe zonirovaniye i statisticheskie parametry ekologicheskoy opasnykh zon goroda Zakamenska (Respublika Buryatiya) [Ecological zoning and statistical parameters of environmentally fragile areas in Zakamensk town (Republic of Buryatia)]. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i upravleniya – East Siberia State University of Technology and Management Bulletin*, 2012, no. 3 (38), pp. 221–227.
 9. Peryazeva E.G., Plyusnin A.M. *Vzaimodeystvie atmosferynykh osadkov s pochvogruntami urbanizirovannykh territoriy Baykalskogo regiona* [Interrelation between atmospheric precipitation and soils on urban lands of the Baikal region]. Ulan-Ude, BNC SO RAN Publ., 2007. 164 p.
 10. Namsaraev B.B., Barkhutova D.D., Danilova E.V. *Geokhimicheskaya deyatel'nost' mikroorganizmov gidroterm Baykalskoy riftovoy zony* [Geochemical activity of microorganisms in thermal springs of Baikal rift zone]. Novosibirsk, Geo Publ., 2011, 302 p.
 11. *Bolshaya Sovetskaya Entsiklopediya* [Great Soviet Encyclopedia]. Available at: <http://www.bse-sci-lib.com> (accessed 15 March 2013).
 12. Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Sukhikh Yu.I. *Ekologo-geokhimicheskie osobennosti prirodnnykh sred Tomskogo rayona i zabol'vaemost naseleniya* [Eco-geochemical peculiarities of the environmental media in Tomsk region and disease incidence of the population]. Tomsk, Kursiv, 2006. 216 p.
 13. Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Baranovskaya N.V., Yankovich E.P. *Sposob opredeleniya uchastkov zagryazneniya uranom okruzhayushchey sredy* [The way to locate contaminated by uranium areas]. Patent RF, no. 2298212, 2007.
 14. Yazikov E.G. *Ekogeokhimiya urbanizirovannykh territoriy yuga Zapadnoy Sibiri*. Avtoreferat Dokt. Diss. [Eco-geochemistry of urban lands on the south of Western Siberia. Dr. Diss. abstract]. Tomsk, 2006. 47 p.
 15. Yazikov E.G., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V. Indikatornaya rol solevykh obrazovaniy v vode pri geokhimicheskoy monitoringe [Indicative role of salt sediments in water in the process of geochemical monitoring]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 2004, no. 1, pp. 67–69.
 16. Mongolina T.A., Baranovskaya N.V., Soktoev B.R. Elementny sostav solevykh otlozheniy pitevykh vod Tomskoy oblasti [Element composition of drinking water salt sediments in Tomsk region]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 204–211.
 17. Yazikov E.G., Baranovskaya N.V., Rikhvanov L.P. Ispolzovanie solevykh obrazovaniy (nakipi) dlya tseley geokhimicheskogo rayonirovaniya territoriy [Usage of salt sediments (limescale) in geochemical zoning of territories]. *Sovremennyye problemy geokhimii, geologii i poiskov mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh: materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Proc. Int. Sci. Conf. Contemporary problems of geochemistry, geology and mineral exploration]. Minsk, 2007, pp. 252–254.
 18. Mongolina T.A. Geokhimicheskie osobennosti solevykh otlozheniy (nakipi) pitevykh vod kak indikator prirodno-tekhnogennoy sostoyaniya territorii. Avtoreferat Dokt. Diss. [Geochemical peculiarities of salt sediments (limescale) as an indicator of natural and anthropogenic status of the territory. Doct. Diss. abstr.]. Tomsk, 2011. 21 p.
 19. Baranovskaya N.V. *Zakonomernosti nakopleniya i raspredeleniya khimicheskikh elementov v organizmakh prirodnnykh i prirodno-antropogennykh ekosistem*. Avtoreferat Dokt. Diss. [Regularities of accumulation and distribution of chemical elements in organisms of natural and natural-anthropogenic ecosystems. Doct. Diss. abstract]. Tomsk, 2011. 46 p.
 20. Tapkhaeva A.E., Taysaev T.T., Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Baranovskaya N.V. Geokhimicheskii analiz podzemnykh vod i biosred v dolinakh rek Obusy, Osy i Idy [Geochemical analysis of ground water and biological media in valleys of Obusa, Osa and Ida rivers]. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the Buryat State University*, 2011, vol. 4, pp. 11–21.
 21. Rikhvanov L.P., Taysaev T.T., Baranovskaya N.V., Soktoev B.R., Mongolina T.A., Sudyko A.F., Ilenok S.S. Geokhimicheskie osobennosti travertinov razlichnykh regionov i ikh prognosticheskoe znachenie [Geochemical peculiarities of travertines in various regions and their prognostic value]. *Sovremennyye problemy geokhimii: materialy Vserossiyskogo soveshchaniya* [Proc. All-Rus. Conf. Contemporary problems of geochemistry]. Irkutsk, 2012, vol. 1, pp. 233–236.
 22. Bryukhanova N.N. *Geokhimiya sery, selena, tellura i soputstvuyushchikh elementov v kaynozoysskikh otlozheniyakh Baykalskoy riftovoy zony* Avtoreferat Dokt. Diss. [Geochemistry of sulfur, selenium, tellurium and associated elements in kainozoic sediments of Baikal rift zone. Doct. Diss. abstract]. Irkutsk, 2007. 21 p.
 23. Rikhvanov L.P., Taysaev T.T., Baranovskaya N.V., Soktoev B.R., Perminova T.A. Novye dannye o radiogeokhimicheskikh osobennostyakh prirodnnykh sred Barguzino-Chivyrkuynskogo peresheyka (oz. Baykal) i Tunkinskoy kotloviny [New data on radio-geochemical features of environmental media of Barguzin-Chivyrkuy strait (Lake Baikal) and Tunka depression]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka: materialy IV Mezhdunarodnoy konferentsii* [Proc. 4th Int. Conf. Radioactivity and radioactive elements in the environment]. Tomsk, 2013, pp. 441–444.
 24. Vinogradov A.P. Srednee sodержание khimicheskikh elementov v glavnykh tipakh izverzhennykh gornykh porod zemnoy kory [Average concentration of chemical elements in main types of igneous rocks of Earth's crust]. *Geokhimiya – Geochemistry International*, 1962, no. 7, pp. 555–571.
 25. Medvedev V.I. Radiatsionnoye vozdeystvie podzemnogo yadernogo vzryva «Rift-3» na territoriyu i naselenie Osinskogo rayona Irkutskoy oblasti [Radiative effect of underground nuclear explosion «Rift-3» on the territory and population of Osa district of Irkutsk region]. *Sibirskiy ekologicheskii zhurnal – Contemporary problems of ecology*, 2005, no. 6, pp. 1073–1078.

Редактирование *А.С. Глазырин*
Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Перевод на англ. язык и корректура *С.В. Жаркова*

Подписано к печати 29.01.2014. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 26,06. Уч.-изд. л. 23,56.
Заказ 46-14. Тираж 500 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел./факс: 8(3822) 563-291, www.tpu.ru, izv@tpu.ru