

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 329, № 6, 2018

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА.
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Редакционная коллегия

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2018

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

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

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ за 2015 г. – 0,339
(без самоцитирования – 0,287)

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

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей. Тематические направления журнала «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов»:

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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

Volume 329, № 6, 2018

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

Editorial Board

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

AIMS AND SCOPE

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

The journal was founded in 1903.

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

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

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

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

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

- Geo Assets Exploration and Refining;
- Geo Assets Mining;
- Geo Assets Transportation;
- Geo Assets Deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and questions Geoecology;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication. Authors are advised to suggest 2 potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor in Chief.

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

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on
www.elibrary.ru, scholar.google.com.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Условия выщелачивания цветных металлов из забалансового сырья** 6
Голик В.И., Разоренов Ю.И., Ляшенко В.И.
- Антиинское рудопроявление как пример рудообразующих систем, связанных с восстановленными интрузиями (Восточное Забайкалье)** 17
Редин Ю.О., Редина А.А., Мокрушников В.П., Дульцев В.Ф.
- Инициирование и распространение детонационных волн в трубе с неоднородным по сечению распределением пузырьков** 30
Гималтдинов И.К., Баязитова А.Р.
- Ландшафтно-геофизический подход к зонированию структуры землепользования на малом водосборе** 39
Ерофеев А.А., Копысов С.Г., Никифоров А.Н.
- Мониторинг состояния земель и оценка динамики антропогенного воздействия на территорию Сахалина** 48
Мелкий В.А., Верхотуров А.А., Попова Я.П., Бурькин А.Н.
- Формирование частиц диоксида титана при гидролизе и термогидролизе водно-спиртовых растворов тетраоксида титана** 58
Пойлов В.З., Казанцев А.Л.
- Проблемы эксплуатации электронасосных агрегатов секционного типа на кимберлитовых рудниках АК «АЛРОСА» и пути их решения** 66
Овчинников Н.П.
- Фракционирование форм нахождения техногенных радионуклидов в водных объектах Семипалатинского испытательного полигона** 74
Торопов А.С.
- Снижение токсичных свойств шламов содового производства с последующей их утилизацией** 85
Калинина Е.В., Рудакова Л.В.
- Редкоземельные элементы в подземных водах Томского водозабора** 97
Попов В.К., Пасечник Е.Ю., Проценко П.И., Гончаров О.Ю.
- Сравнительная характеристика нерастворимых продуктов автоклавного термолитиза смол и асфальтенов Усинской нефти** 106
Антипенко В.Р., Гринько А.А., Головкин А.К., Меленевский В.Н.
- Типизация платиноносных пикритов северо-запада Канского зеленокаменного пояса (Восточный Саян)** 118
Бабинцев Н.А., Чернышов А.И.
- Перспективы поиска залежей нефти в отложениях Девона юго-восточной части Западно-Сибирской плиты** 128
Белозёров В.Б., Гарсия Бальса А.С.
- Причины увеличения обводненности в скважинах после проведения гидравлического разрыва в неоднородных пластах** 140
Валеев А.С., Дулкарнаев М.Р., Котенев Ю.А., Султанов Ш.Х., Бриллиант Л.С.
- Проблемы рудной геологии и человеческий фактор. Часть 2. Магматизм и мезотермальное рудообразование** 148
Кучеренко И.В.
- Conditions of leaching non-ferrous metals from non-commercial reserves** 6
Golik V.I., Razorenov Yu.I., Lyashenko V.I.
- Antiinsky ore occurrence as an example of ore-forming systems related to reduced intrusions (Eastern Transbaikalia)** 17
Redin Yu.O., Redina A.A., Mokrushnikov V.P., Dultsev V.F.
- Initiation and propagation of detonation waves in a tube with bubbles inhomogeneous distribution over cross-section** 30
Gimaltdinov I.K., Bayazitova A.R.
- Landscape physical approach to zoning land use structure at a small watershed** 39
Erofeev A.A., Kopysov S.G., Nikiforov A.N.
- Monitoring of land status and assessment of dynamics of anthropogenic impact on the territory of Sakhalin** 48
Melkiy V.A., Verkhoturov A.A., Popova Ya.P., Burykin A.N.
- TiO₂ particles formation during hydrolysis and thermohydrolysis of TiCl₄ aqueous-alcoholic solutions** 58
Poylov V.Z., Kazantsev A.L.
- Problems of operation of electric pumping sectional type units on kimberlite mines of ALROSA and the ways of their solution** 66
Ovchinnikov N.P.
- Fractionation of technogenic radionuclides species in water bodies of Semipalatinsk test site** 74
Toropov A.S.
- Decrease of toxic properties of soda production sludge and its utilization** 85
Kalinina E.V., Rudakova L.V.
- Rare earth element content in groundwater of Tomsk water intake** 97
Popov V.K., Pasechnik E.Yu., Protsenko P.I., Goncharov O.Yu.
- Comparative characteristics of insoluble products obtained by autoclave thermolysis of resins and asphaltenes from the Usinskaya oil** 106
Antipenko V.R., Grinko A.A., Golovko A.K., Melenevskiy V.N.
- Typification of platinum metal bearing picrites from the north-west of Kansk greenstone belt (East Sayan)** 118
Babintsev N.A., Chernyshov A.I.
- Prospects of searching for oil reservoirs in the Devonian deposits of the south-eastern part of the Western-Siberian plate** 128
Belozherov V.B., Garcia A.S.
- Reasons of water volume increasing in wells after hydraulic gap in homogeneous plates** 140
Valeev A.S., Dulkarnaev M.R., Kotenev Yu.A., Sulnatov Sh.K., Brilliant L.S.
- Ore geology problems and the human factor. Part 2. Magmatism and mesothermal ore-formation** 148
Kucherenko I.V.

УДК 504.55.054:622(470.6)

УСЛОВИЯ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ЗАБАЛАНСОВОГО СЫРЬЯ

Голик Владимир Иванович¹,
v.i.golik@mail.ru

Разоренов Юрий Иванович²,
yiri1963@mail.ru

Ляшенко Василий Иванович³,
vi_lyashenko@mail.ru

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.

² Южно-Российский государственный политехнический университет,
Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

³ Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский
и проектно-изыскательский институт промышленной технологии»,
Украина, 52204, г. Желтые Воды, Днепропетровская обл., Бульвар свободы, 37.

Актуальность. Традиционные технологии подземной разработки рудных месторождений характеризуются безвозвратными потерями забалансовых запасов в недрах. Альтернативу традиционным технологиям разработки составляет технология с выщелачиванием металлов в подземных условиях без извлечения на земную поверхность, позволяющая вовлечь в производство забалансовые запасы.

Цель: доказательство технической возможности и экономической целесообразности выщелачивания металлов из некондиционных металлосодержащих минералов с решением связанных с этим задач.

Метод исследования проблемы основывается на анализе результатов промышленно-экспериментального выщелачивания забалансовых и балансовых руд на скальных месторождениях с анализом извлечения металлов в производственный раствор в результате технологического воздействия раствором реагентов на металлические руды.

Результаты. Предложен алгоритм комбинирования альтернативных технологий подземной разработки с созданием компенсационного пространства для дробления забалансовой руды путем выемки балансовой руды. Обоснован принцип комбинирования технологий отработки месторождения традиционным способом и подземным с селективной выемкой части балансовых руд и образованием необходимого для разрыхления компенсационного пространства, на которое отбивается забалансовая руда с последующим выщелачиванием. Детализованы представления об основных процессах новой технологии: отбойке, выпуске, орошении и интенсификации выщелачивания. Показаны преимущества вовлечения в производство забалансовых руд по новой технологии, в том числе полнота использования недр, упрочнение ресурсной базы, снижение нагрузки на окружающую среду.

Выводы. Комбинирование технологий, позволяющее извлекать часть балансовых руд для заводской переработки и усреднять содержание забалансовых руд до приемлемого с точки зрения выщелачивания значения, отвечает интересам ресурсо- и природосбережения и является перспективным направлением упрочнения сырьевой базы горно-металлургической отрасли, оздоровления экономики и решения экологических и социальных проблем.

Ключевые слова:

Руда, месторождение, забалансовые запасы, выщелачивание, металл, подземная разработка.

Актуальность и цель исследования

Цветная металлургия осуществляет добычу, обогащение, металлургическую переработку руд и концентратов полезных ископаемых, производство химических продуктов, минеральных удобрений, цемента, переработку металлов в изделия и полуфабрикаты, переработку отходов цветных, редких и благородных металлов, производство углеродной продукции, изготовление оборудования для отрасли и содержание инфраструктуры.

Отрасль отличается характерными особенностями:

- материалоемкость, переработка бедного по содержанию полезных компонентов сырья сложного вещественного состава;
- топливо- и электроемкость;
- повышенная трудоемкость;

- комплексность переработки сырья;
- многостадийность технологических процессов;
- зависимость от природного сырьевого фактора;
- повышенная экологическая опасность производства;
- высокая капиталоемкость и фондоемкость.

Развитие мировой экономики сопровождается ростом потребления минеральных ресурсов. Потребление цветных и легирующих металлов за последние 100 лет увеличилось в 3–5 раз и может увеличиться более чем в 5 раз в ближайшие 50 лет.

В переработку вовлекаются руды с низким содержанием металлов и тонкой вкрапленностью. За последние 20 лет содержание цветных металлов в рудах уменьшилось в 1,3–1,5 раза. При этом доля труднообогатимых руд возросла до 40 % от массы добываемого сырья. Если раньше часть руд с высоким содержанием металлов нередко направлялась

непосредственно в металлургическую плавку, то в настоящее время все руды требуют предварительного обогащения. Эффективность предприятий цветной металлургии в большей степени, чем других отраслей, зависит от природного сырьевого фактора.

Расходы на геологоразведочные работы на твердые полезные ископаемые сокращаются, а компенсация погашенных при добыче запасов приростом в результате геологоразведочных работ обеспечивается далеко не для всех видов минерального сырья. Плановые показатели подпрограммы «Воспроизводство минерально-сырьевой базы, геологическое изучение недр» выполнены только по 10 из 23 видов минерального сырья.

Это положение пытаются изменить с помощью мер государственной поддержки добывающих предприятий депрессивных, удаленных, слабо освоенных и геополитически значимых районов России. Фактором низкой активности бизнеса является слабая изученность недр и высокие геологические риски компаний при проведении геологоразведочных работ. Перспективы упрочнения минерально-сырьевой базы связаны с разработкой новых технологий поисков слабо проявленных рудных объектов путем выполнения геологических, тематических и научных исследований в сфере ответственности государства. Это позволит поддерживать оптимальный баланс между разрабатываемыми и неразрабатываемыми запасами и прогнозными ресурсами полезных ископаемых, являющийся главным показателем минерально-сырьевой безопасности страны.

Разработка рудных месторождений подземным способом осуществляется методами, обладающими при всем многообразии вариантов общими признаками:

- образование пустот в земной коре для добычи сырья;
- сохранение геомеханической стабильности окрестных участков земной коры путем заполнения обрушенными вмещающими породами, оставления поддерживающих целиков или возведения искусственных массивов;
- выдача на земную поверхность для переработки всей отделенной от массива отвечающей современным кондициям горной массы;
- оставление в недрах не отвечающей современным кондициям горной массы.

Преимущество традиционной технологии – возможность достижения экономического эффекта в короткое время за счет опережающей отработки наиболее богатых участков месторождений. Это преимущество превращается в крупный недостаток, поскольку большая часть запасов переводится в разряд неактивных и остается в недрах в виде потерь [1].

Формирование стабильного по качеству рудного потока во времени и пространстве обеспечивается селективизацией выемки руд при добыче и комплексном использовании добытых руд.

Альтернативу традиционным технологиям разработки составляет технология с выщелачиванием металлов в подземных условиях без извлечения на земную поверхность [2].

Разработка подземным выщелачиванием принципиально отличается от традиционной технологии:

- заполнение образованных при отбойке руд пустот раздробленной горной массой, участвующей в сохранении геомеханической стабильности окрестных участков земной коры;
- выдача на земную поверхность для переработки только части горной массы из соображений обеспечения компенсационного пространства для отбойки руд;
- переработка разносортных, в том числе забалансовых, руд в недрах.

Несомненными преимуществами метода являются его экономичность, большая по сравнению с традиционной технологией безопасность работ, меньшая нагрузка на природную среду и возможность отрабатывать считавшиеся безвозвратно потерянными в охранных целиках, зонах обрушения, горелых рудах и т. п. запасы [3].

Исследования теоретических аспектов выщелачивания некондиционного металлосодержащего сырья в России начались более 50 лет назад. В теорию и практику выщелачивания внесли вклад: Н.П. Лаверов, Б.Н. Ласкорин, К.Н. Трубецкой, В.А. Чантурия, В.Ж. Арнс, В.К. Бубнов, М.Н. Тедеев, Е.И. Шемякин и др.

Наибольшие успехи достигнуты при выщелачивании меди, урана, золота и цинка, чему посвятили свои труды А.И. Калабин, В.П. Новик-Качан, И.К. Луценко, Л.И. Лунев, И.Е. Рудаков, Р.П. Петров, Н.Н. Хабиров, В.К. Бубнов, М.Н. Тедеев и др.

Несмотря на положительный опыт промышленного выщелачивания, пока только урана, меди, золота, недостаточная изученность процесса препятствует широкому внедрению метода на скальных месторождениях руд остальных металлов.

Подземное выщелачивание в блоках без учета всех природно-техногенных факторов может дискредитировать идею, поэтому основной задачей развития метода является разработка научных основ новой технологии.

Целью экспериментальных исследований является доказательство технической возможности и экономической целесообразности выщелачивания металлов из некондиционных, в том числе забалансовых, руд на месте их природного залегания.

Задача включает в себя решение ряда связанных с подземными работами вопросов, в том числе: бурение скважин, проходка подготовительных и нарезных выработок, взрывные работы, приготовление и переработка растворов, транспорт растворов, орошение блоков, борьба с утечками и т. п.

Методы исследования

Критерием эффективности технологии с выщелачиванием металлов является количество металлов, переведенное в производственный раствор в результате технологического воздействия на металлические руды [4]. Количественная характеристика извлечения позволяет судить об эффективности технологии.

Материалом исследования является минеральное сырье с некондиционным содержанием металлов: бедные руды и хвосты суспензионного обогащения полиметаллических руд.

Для достижения поставленной цели выполняются серии экспериментов по выщелачиванию хвостов обогащения или руды, например:

- 1) агитационное выщелачивание;
- 2) агитационное выщелачивание после активации в сухом состоянии в дезинтеграторе;
- 3) выщелачивание в дезинтеграторе;
- 4) агитационное выщелачивание после активации и выщелачивания в дезинтеграторе;
- 5) многократное выщелачивание и активация в дезинтеграторе.

Эксперименты первой серии проводят следующим образом:

В единичном эксперименте выщелачивают 50 г минералов, измельченных до крупности 2 мм. Количество выщелачивающего раствора определяют из условия обеспечения соотношения «жидкого компонента к твердому».

Раствор смешивают с пробой хвостов или руды, полученную пульпу подвергают агитационному выщелачиванию в течение заданного времени на агитаторе с постоянной и заданной для данного эксперимента скоростью вращения. После выщелачивания пульпу фильтруют, а отфильтрованный раствор анализируют на содержание свинца и цинка.

В остальных сериях эксперименты имеют отличия:

- во второй серии в дезинтеграторе активируют несколько больше 50 г хвостов или руды для компенсации уноса мелких фракций;
- во второй серии минералы выщелачивают спустя минимальное время после дезинтегратора;
- в третьей серии минералы в количестве 50 г добавляют в выщелачивающий раствор и обрабатывают в дезинтеграторе;
- в четвертой серии пульпу также пропускают через дезинтегратор, после чего выщелачивают в агитаторе с постоянной и одинаковой скоростью вращения;
- в пятой серии пульпу пропускают через дезинтегратор неоднократно.

Независимые факторы, влияние которых на извлечение металлов в производственный раствор исследуется, варьируются на минимальном, нулевом и максимальном уровнях, например:

- содержание серной кислоты и хлорида натрия, $X_1 - 2, 6$ и 10 г/л, $X_2 - 20, 90$ и 160 г/л;
- соотношение Ж: Т $X_3 - 4, 7$ и 10 ;

- время агитационного выщелачивания, $X_4 - 0,25, 0,625$ и 1 час, кроме третьей и пятой серии;
- частота вращения роторов дезинтегратора, $X_5 - 50, 125$ и 200 Гц, кроме первой серии;
- количество циклов обработки, $X_6 - 3, 5, 7$ для пятой серии.

Эксперименты повторяются трижды, а их результаты являются основой для формирования матрицы планирования экспериментов и суждения об эффективности извлечения металлов из некондиционного сырья.

Так, руды цветных металлов Садонских месторождений (Россия, Северный Кавказ) с химическим составом, %: $\text{SiO}_2 - 31,4$; $\text{Fe} - 4,4$; $\text{CaO} - 1,96$; $\text{S} - 1,88$; $\text{Ag} - 0,015$; $\text{Cu} - 0,18$; $\text{Mn} - 0,015$; $\text{K}_2\text{O} - 3,5$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 0,8$; $\text{TiO}_2 - 0,03$; $\text{Zn} - 0,95$; $\text{Pb} - 0,84$, обогащали в тяжелых суспензиях с извлечением свинца и цинка – 80–85 %, серебра – 60 %, кадмия – 56 %, висмута – 30 % и выходом хвостов 25–50 %.

По сравнению с агитационным выщелачиванием активация в дезинтеграторе и выщелачивание вне его увеличила извлечение: по свинцу – в 1,4 раза, по цинку – в 1,1 раза.

Выщелачивание в дезинтеграторе по сравнению с вариантом активации в дезинтеграторе и выщелачивания вне его обеспечивает примерно такое же извлечение, но сокращает продолжительность процесса с 15–60 минут до первых секунд, т. е. на 2 порядка. По степени влияния на процесс следуют в порядке убывания: содержание в выщелачивающем растворе реагента, частота вращения роторов дезинтегратора, соотношение Ж: Т.

В качестве результатов промышленных экспериментов используются данные о выщелачивании забалансовых и балансовых руд на скальных месторождениях.

Извлечение металлов из раствора может быть осуществлено вариантом мембранной технологии с отделением взвесей подщелоченного раствора путем создания гидросреды при pH 9–10 с осаждением солей жесткости и металлов.

При исходном содержании железа в исследуемой пробе железистых кварцитов месторождения «Лебединское» (КМА) 8 % выщелачивание в дезинтеграторе по сравнению с вариантом активации в дезинтеграторе и выщелачивания вне его обеспечило примерно одинаковое извлечение железа, но сделало это на 2 порядка быстрее.

Выщелачивание в дезинтеграторе увеличило извлечение металлов в раствор по сравнению с агитационным выщелачиванием на 10–25 % и может быть увеличено до требований санитарных норм при повторении циклов переработки. При исходном содержании в исходных хвостах As, Ba, Be, Bi, Co, Cr, Li, Mo, Nb, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, V, Y на уровне $(30-50) \cdot 10^{-6}$ % извлекается, %: меди $(3,8-4,3) \cdot 10^{-3}$, никеля – $(2,9-3,5) \cdot 10^{-3}$, цинка – $(3,2-4,2) \cdot 10^{-4}$ и в тех же границах другие металлы.

Результаты

Выщелачивание металлов из некондиционных руд на отдельных участках осуществлялось с 50-х гг. прошлого века на урановых месторождениях Средней Азии: Киик-Тал, Чаркасар I, Табошар и др. [5].

Забалансовые руды всего Быкогорского месторождения на Северном Кавказе выщелачивались без разрушения массива фильтрационным потоком реагента в зоне напорных трещинных вод. Извлечение составило 59 %. На месторождении «Звездное» в Казахстане извлечение металла из бедно-балансовых руд составило 70 %.

Балансовые руды впервые в мировой практике выщелачивали в 80-х гг. прошлого века на месторождении «Восток» в Казахстане с извлечением 72 % запасов металла. Полнота извлечения подтверждена проходкой контрольных выработок по хвостам выщелачивания.

На рудниках ОАО «ППГХО» с восьмидесятых годов прошлого века выщелачиванием добывают более 30 % металла с извлечением около 65 %.

Объемы исследований и средства контроля полноты процесса позволяют считать применяемые методы исследований корректными.

Принципиальное различие между традиционной и новой технологиями состоит в том, что традиционной технологией извлекаются только балансовые руды а выщелачиванию доступны и забалансовые запасы.

Металлическое месторождение включает балансовые и забалансовые запасы, соотносящиеся, примерно, как 40 и 60 %. При отработке только традиционными технологиями забалансовые запасы относятся в потери, а из балансовых запасов отрабатываются руды тигульных для данного предприятия с его обогатительной базой металлов.

Отработка выщелачиванием только забалансовых запасов не может обеспечить предприятию финансовое благополучие. Рациональный компромисс достигается при комбинировании альтернативных технологий [6].

Целесообразно рудное тело в пределах блока делить на секции, в которых балансовая руда одним из вариантов традиционной системы извлекается в объеме около 40 % от запасов блока для создания компенсационного пространства при отделении от массива оставшейся руды (рис. 1).

Секции отрабатываются в нисходящем направлении (рис. 2) с отбойкой разносортных запасов на открытую камеру, в ходе чего содержание металлов в руде усредняется и повышается, что улучшает процесс выщелачивания. Взрывание зарядов в скважинах нижележащей секции интенсифицирует процесс выщелачивания в вышележащей секции за счет подвижки рудных кусков.

Основу комбинирования технологий отработки месторождения традиционным способом и подземным составляет селективная выемка части балансовых руд с образованием необходимого для разрыхления компенсационного пространства, на ко-

торое отбивается забалансовая руда другого сорта с последующим выщелачиванием.

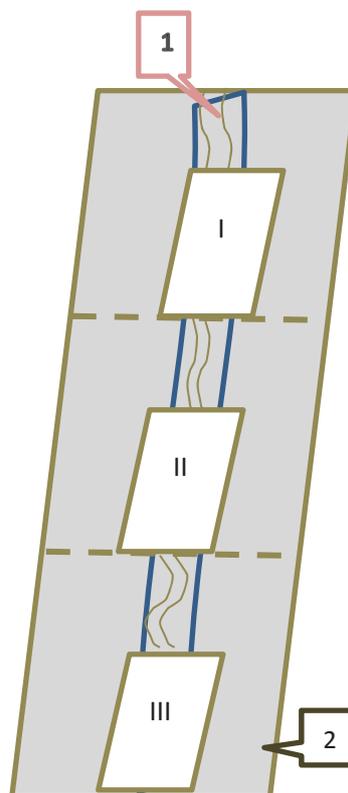


Рис. 1. Комбинированная разработка разносортных руд: 1 – балансовые руды; 2 – забалансовые руды; I–III – участки выемки балансовых руд с созданием компенсационного пространства для дробления забалансовых руд

Fig. 1. Combined exploration of all sorts of ores: 1 are the commercial ores; 2 are the non-commercial ores; I–III are the areas of extraction of commercial ores forming the compensation space for crushing non-commercial ores

Комбинированная технология отвечает концепции ресурсосбережения в большей степени, чем каждая из составляющих технологий в отдельности [7]. Вовлечение в отработку месторождений забалансовых или недоступных для традиционных технологий руд расширяет сырьевую базу горнодобывающей промышленности. Несомненными преимуществами комбинирования являются: экономичность, повышенная по сравнению с традиционным способом безопасность работ и сохранность внешней среды.

Полнота и время извлечения полезного компонента из руды и экономическая эффективность технологии определяется качеством дробления руды. Для выщелачивания наиболее пригодны рудные куски размером от 20 до 50 мм, эффективность выщелачивания снижают фракции размером 200 мм, а куски больших размеров полностью дискредитируют технологию, тем более что не подлежат корректировке.

Компенсационное пространство для отбойки руды образуется путем частичного выпуска ранее

отбитой руды в пределах объема эллипсоида выпуска.

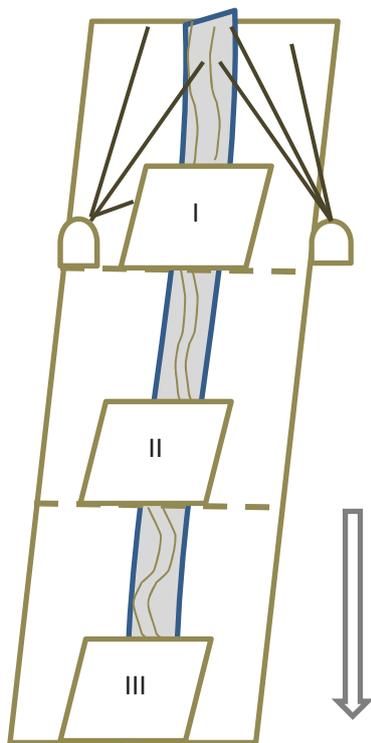


Рис. 2. Отбойка разноразмерных руд для выщелачивания

Fig. 2. Breaking all sorts of ores for leaching

При инфильтрационном выщелачивании раствор реагента опускается по раздробленной руде под действием сил гравитации, не заполняя пустоты между кусками руды, а лишь покрывая их пленкой. Переуплотнение руды создает преграду движению раствора, а большие промежутки между кусками руды не обеспечивают проникновение раствора в кусок.

При уменьшении содержания металлов в продуктивном растворе ниже допустимого значения возникает необходимость интенсификации процессов выщелачивания путем воздействия на руду.

Основным направлением совершенствования технологий подземного выщелачивания в части повышения полноты использования потерь является сплошная бесцеликовая отработка месторождений. Она способствует перманентной интенсификации процесса выщелачивания за счет разрушения руд в пределах новых секций.

Отбойка руды в вертикальных слоях производится на горизонтальную подсечку поярусно снизу вверх секционным взрыванием скважин с опережением подсечки на толщину отбиваемого вертикального слоя.

Отбитая в подсечке руда выпускается в торцы выработок нижнего горизонта. Объем подсечки устанавливается с расчетом нужного разрыхления обрушаемой руды и исключения возможности образования между выпускными выработками не выпущенной руды.

При одинаковой крупности руды скорость процесса извлечения уменьшается с увеличением крупности руд вследствие уменьшения градиента концентраций между поровым раствором и объемом растворителя. Для учета этого фактора рудный массив дробят на куски крупностью, уменьшающейся пропорционально снижению градиента концентраций извлекаемого полезного ископаемого между поровым раствором и объемом растворителя.

Для этого расстояние между концами скважин в верхней части массива увеличивается, а в нижней части массива уменьшается. Расход ВВ в нижней части максимальный, а в верхней части – минимальный.

Дифференцированное дробление массива обеспечивается отбойкой горизонтальными слоями с переменной линией наименьшего сопротивления или приближением формы отбиваемого слоя к конфигурации вертикальной проекции фигуры выпуска руды (рис. 3).

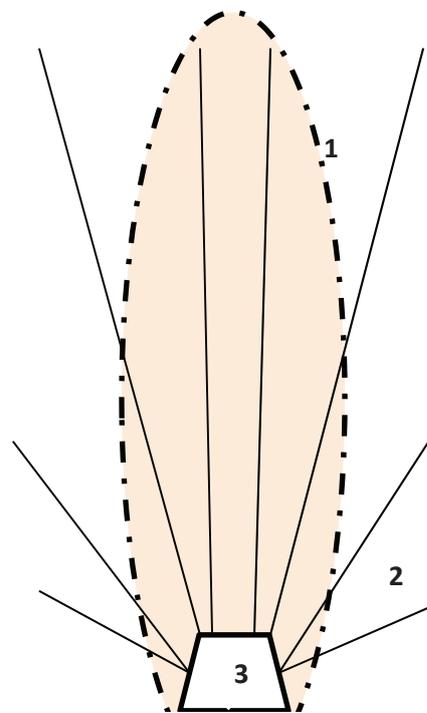


Рис. 3. Формирование эллипсоида разрыхления руд: 1 – граница эллипсоида; 2 – взрывные скважины; 3 – выпускная выработка

Fig. 3. Formation of ore fragmentation ellipsoid: 1 is the boundary of the ellipsoid; 2 are the blast holes; 3 is the final development

Орошение руды может осуществляться по обуренным в магазинированной руде скважинам с обсадкой перфорированными трубами. Эффективность выщелачивания обеспечивается регулированием потоков реагента внутри выщелачиваемого массива. Утечка технологических растворов предотвращается созданием противодиффузионных экранов из веществ, способных к активной полимеризации под воздействием ударных волн.

В процессе выщелачивания руд равномерность распределения потока реагента нарушается, и часть выщелачиваемых руд не вступает в контакт с растворителем.

Интенсификация процесса выщелачивания обеспечивается вовлечением в процесс недостаточно разрыхленных участков блока бурением по газинированной руде скважин, в которые вводятся интенсификаторы. Наиболее часто интенсификация основывается на взрывании зарядов ВВ в выработках и скважинах.

Интенсификация основана на феномене распространения подвижек кусков руды с открытием новых активных поверхностей для выщелачивания.

Интенсификация процесса может быть осуществлена путем невзрывного воздействия на руду, например, воздухом под давлением, ультразвуковыми электромагнитными колебаниями, токами рудных гальванических микроэлементов и т. п. Сплошная бесцеликовая отработка всех запасов месторождения способом подземного выщелачивания должна сочетаться со снижением объемов подготовительно-нарезных работ, что достигается совмещением функций выработок оросительного и дренажного горизонтов.

Так, на месторождении «Быкогорское» доработка забалансовых запасов производилась с этажной обойкой руды и выщелачиванием в инфильтрационном режиме. После освоения на руднике электровакуумных установок для дренажа продукционных растворов функции дренажного горизонта стал выполнять откаточный. Корректировка схем орошения и дренажа улучшила экономические показатели. Трудоемкость системы снизилась в два с лишним раза, удельный вес нарезных работ – в 3,1 раза, эффективность горно-подготовительных работ повысилась в 2,5 раза [8].

Процессы и условия вовлечения в производство забалансовых запасов сведены в таблицу.

Особенность технологии с выщелачиванием состоит в том, что в продукционный раствор извлекаются все содержащиеся в руде металлы в зависимости от технологических факторов. Стоимость некоторых теряемых безвозвратно компонентов может превышать стоимость полученных титановых металлов [9].

Радикальное сокращение объемов хранимых на земной поверхности хвостов обогащения и металлургического передела больше, чем остальные меры, уменьшает воздействие горного производства на окружающую среду [10]. Так, вовлечение в переработку методами выщелачивания забалансовых урановых руд, образовавшихся при освоении месторождений Стрельцовского рудного поля, позволяет существенно увеличить производственную мощность предприятия без больших капитальных затрат методами выщелачивания [11].

Прибыль от вовлечения забалансовых запасов в производство образуется за счет увеличения объемов добычи, прироста продукции и повышения отдачи капитала [12]:

$$\Pi = \sum_1^n \left[(C_p^6 - Z_d^6 - Z_o^6 - Z_m^6) A_5^c + (C_p^k - Z_d^k - Z_o^k - Z_m^k) - \Pi_0 \right] A_k,$$

где Π – годовая прибыль от комбинирования технологий, p ; C_p^6 – Стоимость реализации металлов из балансовых руд, p/t ; Z_d^6 – затраты на добычу балансовых руд, p/t ; Z_o^6 – затраты на обогащение балансовых руд, p/t ; Z_m^6 – затраты на металлургический передел балансовых руд, p/t ; C_p^k – стоимость реализации металлов из комбинированных запасов, p/t ; Z_d^k – затраты на добычу балансовых руд, p/t ; Z_o^k – затраты на обогащение комбинированных запасов, p/t ; Z_m^k – затраты на металлургический передел комбинированных запасов, p/t ; A_5 – объем селективно добытых балансовых руд, t ; A_k – объем добычи комбинированных запасов, t ; n – номенклатура извлекаемых металлов; Π_0 – штраф за хранение загрязняющих окружающую среду отходов при селективной добыче балансовых руд.

Результаты исследования проблемы позволяют утверждать, что:

- процесс перевода металлов в раствор адекватен и управляем;
- использование способов подготовки блоков к отработке традиционными технологиями для подземного блокового выщелачивания не целесообразно;
- добыча металлов выщелачиванием забалансовых руд может быть эффективной при соблюдении определенного для каждого месторождения соотношения объемов добычи балансовых и забалансовых руд и параметров производственных процессов.

Экспериментально определено, что технология обеспечивает извлечение металлов в интервале от 50 до 80 % от исходного содержания в хвостах со снижением остаточного содержания до норм предельно допустимых концентраций (ПДК). Такой результат получен при переработке исследованных хвостов обогащения различных типов: полиметаллов Садоны, угля Российского Донбасса и железистых кварцитов Курской магнитной аномалии. Сходимость результатов подтверждает корректность исследований.

Важной особенностью продуктов механохимической технологии является то, что после извлечения металлов хвосты обогащения могут быть использованы в составе твердеющей смеси не только в качестве инертных заполнителей, но и вяжущих компонентов, так как увеличение активности компонентов на 20–25 % повышает прочность смеси до 1 МПа. При утилизации хвостов обогащения в составе закладочных смесей экономический эффект создается за счет экономии цемента при использовании фракций крупностью до 0,076 мм, доля которых в хвостах обогащения после активации в дезинтеграторе достигает 85 %.

В процессе механоактивации извлекаются все содержащиеся в хвостах металлы до уровня санитарных требований, после чего вторичные хвосты

Таблица. Условия вовлечения забалансовых запасов в производство
Table. Conditions of involving non-commercial reserves into production

Процессы Processes	Цели и способы осуществления Goals and means of implementation	Способ реализации Method of implementation
Подготовка блоков Block preparing	Совмещение функций выработок оросительного и дренажного горизонтов Combination of functions of irrigation and drainage horizons workings Перманентная интенсификация процесса выщелачивания прирезкой новых участков Permanent intensification of leaching by new sites cutback	Сплошная бесцеликовая отработка Solid pilarless mining
Отбойка и дробление руды Ore breaking and crushing	Выемка части балансовых руд для формирования компенсационного пространства Excavation of a portion of commercial ores to form a compensation space	Система с открытым выработанным пространством System with open mined-out space
	Отбойка остальных запасов секции для выщелачивания с условиями: усреднение качества, уменьшение крупности руды пропорционально градиенту концентрации, отбойка слоями с переменной линией наименьшего сопротивления, соблюдение формы эллипсоида выпуска Breaking the rest of section reserves for leaching with the conditions: average quality, reducing the particle size of ore proportional to gradient concentration, slabbing with a variable line of the least resistance, compliance of ellipsoidal drawing	Система с открытым выработанным пространством, обеспечение крупности +20–50 мм и равной плотности руды System with open mined-out space, providing 20–50 mm size and equal ore density
Орошение руды Ore irrigation	С поверхности руды From ore surface По скважинам в разрушенной руде In well in the broken ore С использованием гидравлического разрыва With hydraulic fracturing	Стабилизация скорости фильтрации рабочих растворов Stabilization filtration rate of working solutions
Сбор растворов и изоляция участков Collection of solutions and sealing	Гидроизоляция раствороприемников Waterproofing of plaster-receivers Противофильтрационные завесы Grout curtain Электровакуумный дренаж растворов Vacuum drainage of solutions	Исключение миграции растворов в окружающую среду Exception of solution migration into environment
Интенсификация процесса Process intensification	Взрывание зарядов ВВ в скважинах Blasting explosive charges in boreholes Нагнетание сжатого воздуха Compressed air injection Ультразвуковые колебания Ultrasonic vibrations Электромагнитная обработка Electromagnetic processing Промывка растворами Rinsing with solutions Введение химических составов Introduction of chemical compounds Использование штаммов бактерий Use of bacterial strains	Управляемый перевод металлов в жидкую фазу Controlled metal transfer into liquid phase
Контроль полноты выщелачивания Leaching control	Бурение контрольных скважин с отбором проб и размещением приборов Installing monitoring wells with sampling and deployment devices Проходка выработок с отбором проб и документацией Excavation of workings with sampling and documentation	Получение объективных сведений о корректности технологии Obtaining objective information on correctness of technology

становятся пригодными для изготовления товарной продукции без ограничений. Параметры новой технологии требуют адаптации к различным условиям современного горного производства.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами извлечения металлов из полиметаллических руд Садонского месторождения и железистых кварцитов Лебединского месторождения в лаборатории Северо-Кавказского горно-металлургического института.

Вовлечение в производство колоссальных минеральных ресурсов создает новую сырьевую базу для горной промышленности и избавляет от необходимости вовлечения в эксплуатацию новых месторождений, что особо актуально ввиду дефицита ряда металлов для обеспечения национальной безопасности России.

Выщелачивание забалансовых руд открывает возможности получения редкоземельных элементов при химическом обогащении металлосодержа-

щих минералов, поскольку и они извлекаются в коллективный раствор [13].

Насыщение производства мощной крупногабаритной техникой стимулирует увеличение разубоживания и потерь руды, поэтому стратегия развития технологий рассматривает использование некондиционных запасов как компенсацию потерянному и разубоженного сырья [14].

Освоение технологий выщелачивания дает возможность рациональнее распоряжаться минеральными ресурсами, определяющими судьбу земной цивилизации [15].

Реализация указанного направления может быть ускорена разработкой средств и методов активации технологических процессов, например электро-химического выщелачивания золота из упорного минерального сырья [16].

Разработки указанного направления используются в процессах подготовки специалистов нового поколения [17]. Они рассматриваются как технологии ближайшего будущего [18].

Комбинирование технологий по предложенной схеме является механизмом реализации стратегии расширения сырьевой базы горнорудных предприятий на основе комплексного использования минеральных ресурсов месторождений [19].

Поэтому работы по экономическому обоснованию разработки забалансовых руд как основного фактора повышения производственной мощности горных предприятий так актуальны [20].

Перспективы комбинированных механохимических технологий связаны, в первую очередь, с диверсификацией производства цветных, ценных и благородных руд, вскрываемых химическими реагентами. Во вторую очередь могут осваиваться руды менее вскрываемых металлов по мере оптимизации энергетических затрат на активацию процессов выщелачивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голик В.И., Разоренов Ю.И. Проектирование горных предприятий. – Новочеркасск: Набл, 2007. – 262 с.
2. Harris J.M., Roach B. Environmental and Natural Resource Economics. A Contemporary Approach. – Armonk, New York: M.E. Sharpe, Inc., 2013. – 246 p.
3. Freeman A.M., Herriges J.A., Kling C.L. The measurement of environmental and resource values. Theory and methods. – New York, USA: RFF Press, 2014. – 325 p.
4. Комащенко В.И., Васильев П.В., Масленников С.А. Технологиям подземной разработки месторождений КМА – надежную сырьевую основу // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – № 2. – С. 101–114.
5. Голик В.И., Брюховецкий О.С., Габараев О.З. Технологии освоения месторождений урановых руд. – М.: РГГУ, 2007. – 131 с.
6. Каплунов Д.Р., Юков В.А., Лавенков В.С. Сопоставление блокового и скважинного выщелачивания для подземной добычи медных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 3. – С. 7–14.
7. Dubiński J. Sustainable Development of Mining Mineral Resources // J. Sustain. Min. – 2013. – № 1. – P. 1–6.

Условием успеха новой технологии является разработка методов селективного извлечения металлов из коллективного раствора.

Выводы

1. Выборочная отработка балансовых запасов рудных месторождений с переводом забалансовых запасов в разряд неактивных не отвечает принципам гуманного отношения к природным ресурсам.
2. Извлечение из добытых руд только титульных металлов с потерей остальных в хвостохранилищах увеличивает недостатки традиционных технологий добычи и переработки металлических руд.
3. Интересам ресурсо- и природосбережения отвечает комбинированная технология, позволяющая извлекать часть балансовых руд для заводской переработки и усреднять содержание забалансовых руд до приемлемого с точки зрения выщелачивания значения.
4. Подземное выщелачивание металлов является перспективным направлением упрочнения сырьевой базы горно-металлургической отрасли, оздоровления экономики и решения экологических и социальных проблем.
5. Реализация технологии с выщелачиванием в промышленном производстве формирует новые проблемы: извлечение металлов из раствора выщелачивания, нейтрализация маточных растворов, повышение механической и химической стойкости рабочего органа активатора и др. Они составляют вторую очередь промышленного освоения инновационной технологии и требуют организации комплексных исследований.

В статье представлены результаты исследований, выполненных по программе Erasmus + 574061-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP «Modernization of geological education in Russian and Vietnamese universities».

8. Голик В.И. Специальные способы разработки месторождений. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 132 с.
9. Randolph E., Miller Sh., Miller G. Minimizing acid consumption in mixed oxide/supergene and sulfide heap leach // Proc. of the 3rd International Conference on Heap Leach Solution. – Lima, 2015. – P. 67–75.
10. Комащенко В.И. Эколого-экономическая целесообразность утилизации горнопромышленных отходов с целью их переработки // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 4. – С. 23–30.
11. Морозов А.А., Яковлев М.В. Вовлечение в переработку забалансовых урановых руд, образовавшихся при освоении месторождений Стрельцовского рудного поля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 12. – С. 166–174.
12. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – V. 7. – № 3. – P. 49–52.
13. Jordens A., Cheng Ying Ping, Waters K.E. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals // Minerals Engineering. – 2013. – V. 41. – P. 97–114.

14. Matthews T. Dilution and ore loss projections: Strategies and considerations // SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference: Navigating the Global Waters. – Denver, United States, 2015. – P. 529–532.
15. Capilla A.V., Delgado A.V. The destiny of the earth's mineral resources. – London: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015. – 235 p.
16. Самусев А.Л., Миненко В.Г. Влияние параметров химико-электро-химического выщелачивания на извлечение золота из упорного минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 5. – С.134–140.
17. Development of Mineral Processing Engineering Education in China University of Mining and Technology / Haifeng Wang, Yaqun He, Chenlong Duan, Yuemin Zhao, Youjun Tao, Cuiling Ye // Advances in Computer Science and Engineering. AISC 141. – Berlin Heidelberg, 2012. – P. 77–83.
18. Seinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // Hydrometallurgy. – 2015. – V. 157. – P. 306–324.
19. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Расширение сырьевой базы горнорудных предприятий на основе комплексного использования минеральных ресурсов месторождений // Горный журнал. – 2013. – № 12. – С. 29–33.
20. Шелкунова Т.Г. Экономическое обоснование разработки забалансовых руд // Современные проблемы рыночного реформирования экономики: Сб. «Научные труды аспирантов, соискателей и преподавателей экономического факультета». – Владикавказ: Терек, 2005. – С. 45–52.

Поступила 15.12.2017 г.

Информация об авторах

Голик В.И., доктор технических наук, профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственный технологический университет).

Разоренов Ю.И., доктор технических наук, профессор, первый проректор Южно-Российского государственного политехнического университета.

Ляшенко В.И., кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела Государственного предприятия «Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии».

UDC 504.55.054:622(470.6)

CONDITIONS OF LEACHING NON-FERROUS METALS FROM NON-COMMERCIAL RESERVES

Vladimir I. Golik¹,
v.i.golik@mail.ru

Yuri I. Razorenov²,
yiri1963@mail.ru

Vasili I. Lyashenko³,
vilyashenko2017@gmail.com

¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),
44, Nikolaev street, Vladikavkaz, 362021, Russia.

² M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
132, Prosvyashcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia.

³ Ukrainian Research, Designing and Survey Institute of Industrial Technology,
37, Bulvar Svobody, Zheltye Vody, 52204, Ukraine.

The relevance. Traditional technologies of underground development of ore deposits are characterized by irretrievable losses of non-commercial reserves in the ground. The alternative to traditional technologies is the technology of metals leaching in underground conditions without extracting the earth's surface, allowing production of non-commercial reserves.

The aim of the study is to prove technical and economic feasibility of leaching metals from sub-standard metal-bearing minerals while solving the problems related to this.

Method of the study problem is based on the analysis of the results of the industrial-experimental leaching non-commercial ores, and commercial ones on rocky fields with the investigation of metal extraction in product solution due to the technological exposure of a reagent solution on metal ores.

Results. The authors have proposed the algorithm of combining the alternative technologies of underground mining with the development of a compensation space for crushing non-commercial ores by excavating commercial ones; justified the principle of combining the technologies of mine treatment in traditional way and underground one with selective extraction of a part of commercial ores and formation of the compensation space required for fragmentation, where the non-commercial ore is removed with further leaching. The paper introduces the detailed understanding of the main processes of a new technology: blasting, draw, irrigation and intensification of leaching, and demonstrates the benefits of engaging non-commercial ores in manufacture by a new technology, including the utilization of mineral resources, strengthening the resource base, reducing the burden on the environment.

Conclusions. Combination of technologies which allows extracting a part of commercial ores for factory processing and averaging the content of non-commercial ores to the acceptable value within leaching, meets the interests of resource and nature preservation and it is a promising direction of strengthening the raw material base of mining industry, revitalizing the economy and addressing the environmental and social problems.

Key words:

Ore, mine, non-commercial reserves, leaching, metal, underground mining.

The paper introduces the results of the research carried out by the program Erasmus + 574061-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP «Modernization of geological education in Russian and Vietnamese university».

REFERENCES

- Golik V.I., Razorenov Yu.I. *Proektirovanie gornykh predpriyat* [The design of mining enterprises]. Novocherkassk, Nabla Publ., 2007. 262 p.
- Harris J.M., Roach B. *Environmental and Natural Resource Economics. A Contemporary Approach*. Armonk, New York, M.E. Sharpe, Inc., 2013. 246 p.
- Freeman A.M., Herriges J.A., Kling C.L. *The measurement of environmental and resource values. Theory and methods*. New York, USA, RFF Press, 2014. 325 p.
- Komashchenko V.I., Vasilyev P.V., Maslennikov S.A. Technology of underground mining KMA – reliable raw material basis. *Proceedings of the Tula state University. Earth science*, 2016, no. 2, pp. 101–114. In Rus.
- Golik V.I., Bryukhovetsky O.S., Gabaraev O.Z. *Tekhnologii osvoeniya mestorozhdeny uranovykh rud* [Technology of developing uranium ore deposits]. Moscow, RGGU Publ., 2007. 131 p.
- Kaplunov D.R., Yukov V.A., Lavenkov V.S. Comparison of block and borehole underground leaching for production of copper ore. *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten*, 2017, no. 3, pp. 7–14. In Rus.
- Dubiński J. Sustainable Development of Mining Mineral Resources. *J. Sustain. Min.*, 2013, no. 1, pp. 1–6.
- Golik V.I. *Spetsialnye sposoby razrabotki mestorozhdeny* [Special methods of field development]. Moscow, INFRA-M Publ., 2014. 132 p.
- Randolf E., Miller Sh., Miller G. Minimizing acid consumption in mixed oxide/supergene and sulfide heap leach. *Proc. of the 3rd International Conference on Heap Leach Solution*. Lima, 2015. pp. 67–75.
- Komashchenko V.I. Ecological and economic feasibility of disposal of mining waste for their processing. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2015, no. 4, pp. 23–30. In Rus.

11. Morozov A.A., Yakovlev M.V. Involvement in processing of non-commercial uranium ores, formed at development of deposits of streltsovskoye ore field. *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten*, 2016, no. 12, pp. 166–174. In Rus.
12. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 49–52.
13. Jordens A., Cheng Ying Ping, Waters K.E. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*, 2013, vol. 41, pp. 97–114.
14. Matthews T. Dilution and ore loss projections: Strategies and considerations. *SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference: Navigating the Global Waters*. Denver, United States, 2015. pp. 529–532.
15. Capilla A.V., Delgado A.V. *The destiny of the earth's mineral resources*. London, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015. 235 p.
16. Samusev A.L., Minenko V.G. Influence of chemical-electro-chemical leaching parameters on gold recovery from resistant mineral raw materials. *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten*, 2016, no. 5, pp. 134–140. In Rus.
17. Haifeng Wang, Yaqun He, Chenlong Duan, Yuemin Zhao, Youjun Tao, Cuiling Ye. Development of Mineral Processing Engineering Education in China University of Mining and Technology. *Advances in Computer Science and Engineering. AISC 141*. Berlin Heidelberg, 2012. pp. 77–83.
18. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*, 2015, vol. 157, pp. 306–324.
19. Kaplunov D.R., Rylnikova M.V., Radchenko D.N. Expanding the raw material base of mining enterprises on the basis of complex use of mineral resources deposits. *Gorny zhurnal*, 2013, no. 12, pp. 29–33. In Rus.
20. Shelkunova T.G. Ekonomicheskoe obosnovanie razrabotki zabalansovykh rud [Economic feasibility of non-commercial ore exploration]. *Sovremennye problemy rynochnogo reformirovaniya ekonomiki. Sb. Nauchnye trudy aspirantov, soiskateley i predavateley ekonomicheskogo fakulteta* [Modern problems of market reforming of economics. Works of postgraduates and professors of the economic faculty]. Vladikavkaz, Terek Publ., 2005. pp. 45–52.

Received: 15 December 2017.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., professor, professor, North-Caucasus Mining and Metallurgical Institute (state technological University).

Yuri I. Razorenov, Dr. Sc., professor, first vice-rector, South-Russian State Polytechnic University.

Vasily I. Lyashenko, Cand. Sc., head of research department, Ukrainian Research, Designing and Survey Institute of Industrial Technology.

УДК 553.41(571.55)

АНТИИНСКОЕ РУДОПРОЯВЛЕНИЕ КАК ПРИМЕР РУДООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ, СВЯЗАННЫХ С ВОССТАНОВЛЕННЫМИ ИНТРУЗИЯМИ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Редин Юрий Олегович¹,
redin@igm.nsc.ru

Редина Анна Андреевна¹,
redina@igm.nsc.ru

Мокрушников Виктор Павлович¹,
viktorm@igm.nsc.ru

Дульцев Владислав Федорович¹,
dultsev@igm.nsc.ru

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

Актуальность: выяснение генетической связи рудной минерализации с позднеюрскими магматическими породами шахтаминского комплекса на примере Антиинского рудопоявления.

Цель: на основе петрографических, петрохимических, минералого-геохимических, изотопных и физико-химических исследований установить генезис Антиинского рудопоявления.

Объекты: Антиинское рудопоявление, а также несколько более мелких пунктов минерализации, локализованных в пределах одноименного массива шахтаминского комплекса.

Методы. Минеральный состав, текстурные особенности, взаимоотношение минеральных индивидов между собой изучались под оптическим микроскопом в отраженном и проходящем свете. Мономинеральные фракции сульфидов отбирались под бинокляром из протолок и сульфидных концентратов. Химический состав сульфидных минералов и самородного золота анализировался в полированных шашках микрорентгеноспектральным методом на приборе JEOL JXA-8100, а также с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM) на приборе JSM-6510, снабженном энерго-дисперсионным спектрометром (EDS) фирмы OXFORD. Изотопный состав серы в сульфидных минералах определяли в Центре коллективного пользования научным оборудованием многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Погрешность в определении $\delta^{34}\text{S}_{\text{сдт}}$ (1 σ) 0,1 ‰. Флюидные включения были изучены в прозрачно-полированных пластинках методами крио-термометрии и Рамановской спектроскопии. Криотермометрические исследования выполнялись в микротермокамере THMSG-600 фирмы Linkam. Состав газовой фазы флюидных включений изучался методом Рамановской спектроскопии спектрометром Ramanog U-1000 и детектором Horiba DU420E-OE-323 фирмы Jobin Yvon, лазером Millennium Pro фирмы Spectra-Physics; Confocal Raman Microscope alpha 300R фирмы WITec. Анализ петрогенных компонентов (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , P_2O_5 , Na_2O , K_2O , H_2O , ППП) в магматических породах был выполнен методом «мокрой химии» в химической группе ЦКП «Геодинамика и Геохронология» Института земной коры СО РАН (г. Иркутск).

Результаты. Антиинское рудопоявление расположено в Агинской тектонической зоне Восточного Забайкалья и приурочено к одноименному массиву шахтаминского комплекса. В работе современными методами изучен минеральный состав руд, выделены и охарактеризованы основные минеральные ассоциации. Приведены детальные данные по химическому составу самородного золота и сульфидных минералов, их изотопному составу. Установлено, что основной продуктивной минеральной ассоциацией является галенит-буланжеритовая с самородным золотом. Результаты исследования изотопного состава серы сульфидных минералов свидетельствуют о магматическом источнике серы рудных минералов. Проведенные петрографические и петрохимические исследования показали, что магматические породы Антиинского массива являются пералюминиевыми, магниезиальными, высококалиевыми, восстановленными гранитоидами. Полученные данные позволяют предположить, что магматические породы Антиинского массива наиболее близки к высококалиевому I-типу гранитоидов. Термобарогеохимические исследования флюидных включений кварцевых жил Антиинского рудопоявления и пунктов минерализации Au 48, 49 показали, что их формирование происходило в схожих физико-химических условиях. Образование ранней вкрапленной пирит-арсенипиритовой минерализации шло из восстановленных углекислотных среднетемпературных хлоридных растворов на глубине 8–10,5 км. Позднее рудоносный флюид эволюционировал: снизились содержание углекислоты и соленость флюида. Прожилково-вкрапленная галенит-буланжеритовая минерализация формировалась из восстановленных среднетемпературных слабосоленых растворов, вероятно, в условиях низких давлений. Полученные данные позволяют сделать вывод о принадлежности Антиинского рудопоявления к золоторудным месторождениям, связанным с восстановленными интрузиями («reduced intrusion-related gold deposit»).

Ключевые слова:

Золоторудные месторождения, связь с магматизмом, минеральный состав, условия формирования, Восточное Забайкалье.

Введение

Антиинское рудопоявление расположено в Агинской тектонической зоне Восточного Забайкалья и приурочено к одноименному массиву шах-

таминского комплекса. В металлогеническом отношении Агинская зона известна как область наиболее широкого в регионе развития редкометалльного оруденения. Пространственно и генетически

оруденение связано с многочисленными массивами кукульбейского (J_3) лейкогранитового комплекса. Наряду с массивами гранитов кукульбейского комплекса в Агинской зоне широко развиты небольшие интрузии шахтаминского (J_2 – J_3) комплекса габбро-диорит-монцодиорит-гранодиоритового состава [1]. Некоторые из них сопровождаются молибденовой, шеелитовой и золотой минерализацией. Одним из них является Антиинский массив, в приконтактовых частях которого установлена повышенная плотность золотой минерализации (рис. 1).

С магматическими породами шахтаминского комплекса многие исследователи связывают промышленное молибденовое, полиметаллическое, золото-полиметаллическое и золотое оруденение, а также проявления мышьяка, сурьмы и других металлов [2]. Наиболее крупные золоторудные и золотосодержащие комплексные месторождения, пространственно связанные с проявлением шахтаминского комплекса, сосредоточены в Аргунской тектонической зоне. К их числу относятся: Бугдинское (Mo-W (Au)-порфиоровое), Быстринское (Au-Cu-Fe-скарновое), Лугоканское (Au-Cu-скарновое), Култуминское (Au-Cu-Fe-скарновое) и др. Вместе с тем вопросы генетических соотношений магматизма и последующей золоторудной минерализации, несмотря на высокую степень геологической изученности региона, остаются до конца не решенными. В настоящее время в современной зарубежной литературе выделяется отдельный класс золоторудных месторождений – «intrusion-related gold system» (IRGS) (золоторудные месторождения, связанные с интрузиями). Месторождения «intrusion-related gold system» являются одним из важнейших источников золота [3]. Этот класс, в свою очередь, подразделяется на месторождения, связанные с «окисленными» (медно-порфировые) и «восстановленными» интрузиями [4–6]. На основе минералого-геохимических, петрографических, петрохимических, изотопных и физико-химических данных рассмотрен генезис Антиинского рудопроявления.

Геологическое строение

Общая характеристика геотектонической позиции. Территория Агинской зоны сложена преимущественно метаморфизованными песчано-сланцевыми породами протерозоя-палеозоя в ее восточной и пермотриаса в западной части. Согласно современному геодинамическому районированию Забайкалья, зона характеризовалась высокой тектонической активностью и представляет Ононский островодужный террейн, ограниченный с северо-запада и юго-востока ветвями Монголо-Охотской сутуры, в котором выделяются девонско-раннекарбоновые, позднепермско-раннетриасовые аккреционно-субдукционные клинья и позднепермско-раннетриасовый задуговой бассейн [2].

Вмещающие породы. Магматические породы Антиинского массива прорывают терригенные от-

ложения поздней перми (соктуйская свита) и нижней юры (сивачинская и государевская свита). Отложения соктуйской свиты (P_2sk) развиты в западной части массива и представлены песчаниками, туфопесчаниками, конгломератами, конгломерато-брекчиями, гравелитами, алевролитами, аргиллитами и туфами. Отложения нижней юры распространены в восточной части массива. Сивачинская свита (J_1sv) сложена преимущественно конгломератами, гравелитами с прослоями песчаников, алевролитов и аргиллитов. Государевская свита (J_1gs) представлена песчаниками, алевролитами, аргиллитами с прослоями конгломератов. В приконтактовых частях вмещающие породы претерпели изменения, которые выражаются в образовании биотитовых, кордиерит-биотитовых и андалузитовых роговиков. Ширина экзоконтактовых зон варьирует от десятков до сотен метров. Поздние гидротермально-метасоматические изменения выражены локальной березитизацией.

Структурно-тектонические особенности. Антиинский массив приурочен к тектоническому контакту пермских и юрских структур и представляет собой узкое трещинное тело с широко развитыми порфировыми фациями в эндоконтактах и апофизах. Самым крупным разрывным нарушением является Биликтуй-Антиинский листрический взброс, связанный с крупной надвиговой зоной, которая отделяет юрские складчатые структуры от докембрийских и палеозойских.

Магматизм. В Антиинском массиве центральная и восточная части сложены граносиенитами и гранодиоритами с переходами до гранитов, а западная и северная – кварцевыми монцодиоритами и монцодиоритами, подобным породам соседнего Ноцуйского массива. Это давало основание считать оба массива выступами единого более крупного интрузива. Нами изучались магматические породы, отобранные в северной части (район Антиинского рудопроявления) и в юго-восточной части Антиинского массива (район пунктов минерализации Au 48, 49) (рис. 1). Петрографические исследования показали, что в северной части массива развиты кварцевые монцодиориты. Они имеют массивную текстуру и гипидиоморфную, монцитовую структуру. Породы сложены кварцем, плагиоклазом, калиевым полевым шпатом, биотитом, роговой обманкой и клинопироксеном. Количество темноцветных минералов достигает 20–30%. Плагиоклаз преобладает над калиевым полевым шпатом (насыщен пертитовыми вростками). Роговая обманка замещает клинопироксен. Содержание кварца около 5–8%. В юго-восточной части массива породы более измененные и представлены кварцевыми монцодиоритами. Они имеют массивную (крупнозернистую) текстуру и гипидиоморфную, монцитовую структуру. Породы сложены кварцем, плагиоклазом, калиевым полевым шпатом, биотитом, роговой обманкой и единичными реликтами клинопироксена. Акцессорные минералы представлены сфеном.

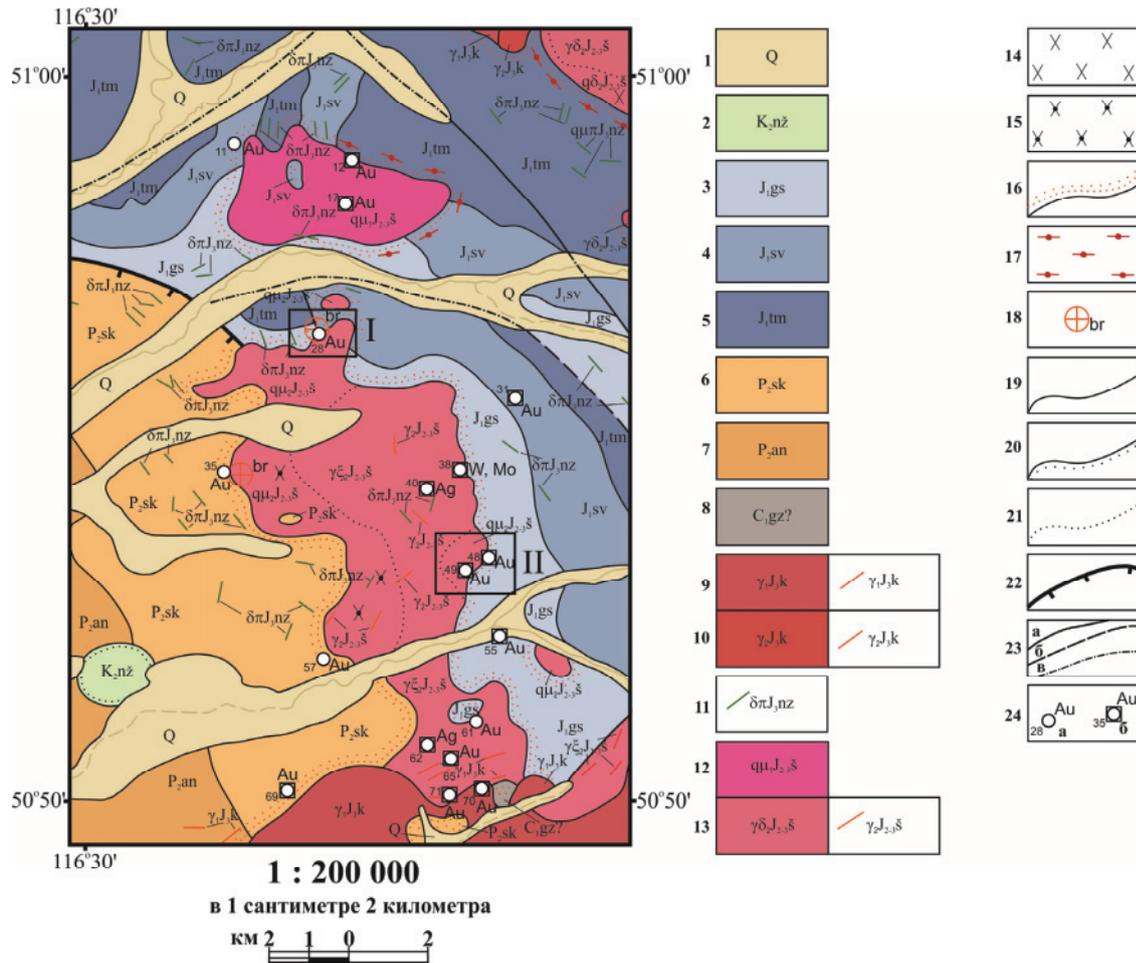


Рис. 1. Фрагмент геологической карты М-50-IX с дополнениями авторов: 1 – четвертичные отложения; 2 – ножийская свита: галечники и валунники; 3 – государственская свита: песчаники, алевролиты; 4 – сивашинская свита: конгломераты, гравелиты, прослои и пачки песчаников; 5 – тамежинская свита: песчаники, алевролиты, аргиллиты; 6 – сокуйская свита: песчаники, туфопесчаники, конгломераты, конгломерато-брекчии, гравелиты, алевролиты; 7 – антиинская свита: песчаники, туфопесчаники, алевролиты, аргиллиты, конгломераты; 8 – газимурозаводская (?) свита: кварцево-сплюснутые сланцы, мрамора; 9, 10 кукульбейский комплекс: 9 – граниты, лейкограниты; дайки гранитов; 10 – литионит-амазонит-альбитовые граниты; дайки гранитов; 11 – нерчинскозаводский комплекс: дайки диоритовых порфиров; кварцевых монцодиоритовых порфиров (qm₁); 12, 13 шахтаминский комплекс: 12 – кварцевые монцодиориты (qm₂); 13 – гранодиориты (γδ₂), граносиениты (γξ₂), кварцевые монцодиориты (qm₂), кварцевые диориты (qδ₂), дайки гранитов (γ₂); 14 – кварцевые диориты; 15 – кварцевые монцодиориты; 16 – контактовые роговики и ороговикованные породы, тектониты; 17 – динамометаморфизованные породы филлиты и эпидот-хлоритовые сланцы; 18 – внемасштабные тела: березиты; 19 – геологические границы между разновозрастными подразделениями и телами разного состава внутри них; 20 – несогласное залегание; 21 – несогласное залегание между фашиально разными образованиями; 22 – структурные швы сложной кинематики с преобладанием листрических взбросов и надвигов; 23 – разломы второго порядка (а – установленные, б – предполагаемые, в – скрытые под вышележащими образованиями достоверные); 24 – (а) рудопроявления, (б) пункты минерализации. Черными прямоугольниками показаны объекты исследования: I – Антиинское рудопроявление (28); II – пункты минерализации Au 48, 49

Fig. 1. Fragment of the geological map M-50-IX with additions of the authors: 1 are the quaternary sediments; 2 is the nozisky formation: pebbles and boulders; 3 is the gosudarevsky formation: sandstones, siltstones; 4 is the sivashinsky formation: conglomerates, gravel, interlayers and bundles of sandstones; 5 is the tamenginsky formation: sandstones, siltstones, mudstones; 6 is the soktuisky formation: sandstones, conglomerates, conglomerate-breccias, gravelites, siltstones; 7 is the antiinsky formation: sandstones, tuff sandstones, siltstones, argillites, conglomerates; 8 is the gazimurozavodsky (?) formation: quartz-micaceous shales, marble; 9, 10 is the Kukulbeisky complex: 9 are the granites, leucogranites; dikes of granites; 10 are the lithionite-amazonite-albite granites; dikes of granites; 11 is the Nerchinskoyavodsky complex: dykes of diorite porphyrites; quartz monzodiorite porphyrites (qm₁); 12, 13 is the Shakhtama complex: 12 are the quartz monzodiorites (qm₂); 13 are the granodiorites (γδ₂), granosyenites (γξ₂), quartz monzodiorites (qm₂), quartz diorites (qδ₂), dikes of granites (γ₂); 14 are the quartz diorites; 15 are the quartz monzodiorites; 16 are the hornfels, tectonites; 17 are the dynamo-metamorphized rocks, phyllites and epidote-chlorite schists; 18 are the out-of-scale bodies: berezites; 19 are the geological boundaries between different age divisions and bodies of different composition within them; 20 is the discordant bedding; 21 is the discordant bedding between facies of different formations; 22 are the structural seams of complex kinematics with predominance of lustratic ups and thrusts; 23 are the second-order faults (a – established, б – assumed, в – hidden under the overlying formations, reliable); 24 – (a) ore occurrences, (б) mineralization points. Black rectangles show the objects of research: I – Antiinsky ore occurrence (28); II – points of mineralization Au 48, 49

Петрогенные элементы. Содержания петрогенных элементов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты определения содержания породообразующих элементов в образцах магматических пород шахтаминского комплекса методом силикатного анализа

Table 1. Results of determination of rock-forming elements in samples of igneous rocks of the Shakhtama complex, by the method of silicate analysis

Компонент Component	1						2	
SiO ₂	60,16	59,73	59,63	59,91	60,33	60,71	61,28	
TiO ₂	0,90	0,90	0,88	0,88	0,90	0,89	0,76	
Al ₂ O ₃	14,56	14,77	14,68	14,89	14,64	14,69	14,71	
Fe ₂ O ₃	1,56	1,58	1,53	1,51	1,54	1,76	1,75	
FeO	3,61	3,56	3,61	3,60	3,61	3,09	3,16	
MnO	0,08	0,09	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07	
MgO	5,10	5,07	5,15	5,04	5,11	4,69	4,63	
CaO	4,80	4,90	4,93	4,77	4,80	4,68	4,68	
Na ₂ O	3,86	3,90	3,88	3,84	3,91	3,79	3,77	
K ₂ O	3,76	3,71	3,74	3,74	3,78	3,50	3,49	
P ₂ O ₅	0,38	0,39	0,38	0,39	0,38	0,37	0,36	
H ₂ O ⁺	0,15	0,12	0,14	0,15	0,15	0,21	0,19	
ППП/LOI	1,08	1,11	1,08	1,11	1,10	1,22	1,22	
Сумма/Total	100,00	99,83	99,71	99,89	100,33	99,68	100,06	

Примечание: 1 – кварцевые монцодиориты, развитые в северной части Антиинского массива (район Антиинского рудопроявления); 2 – кварцевые монцодиориты, развитые в юго-восточной части Антиинского массива (район пунктов минерализации Au 48, 49).

Notes: 1 are the quartz monzodiorites developed in the northern part of the Antiinsky massif (the area of the Antiinsky ore occurrence); 2 are the quartz monzodiorites developed in the southeastern part of the Antiinsky massif (points of mineralization Au 48, 49).

Интервалы содержания SiO₂ в породах составляют от 59,73 до 60,33 мас. % для первых и от 60,71 до 61,28 мас. % для вторых. Магматические породы характеризуются повышенной суммой щелочей (K₂O+Na₂O) – от 7,58 до 7,69 мас. % для первых и от 7,26 до 7,29 мас. % для вторых. Содержание K₂O составляет от 3,71 до 3,78 мас. % для первых и от 3,49 до 3,5 мас. % для вторых (рис. 2, а). Магматические породы относятся к пералюминиевым образованиям: диапазоны ASI (Al₂O₃/(CaO–1,67P₂O₅+Na₂O+K₂O)) составляют для первых от 1,23 до 1,27 и для вторых от 1,29 до 1,30. По щелочно-известковистому индексу (MALI) магматические породы относятся к известково-щелочным (рис. 2, б). По железистости (Fe*) они попадают в область магнезиальных гранитоидов (рис. 2, в). Для разделения магматических пород на магнетитовую и ильменитовую серию была использована диаграмма, предложенная S. Ishihara и W. W. Chappell [7] (рис. 2, г). Отношение Fe₂O₃/FeO для первых составляет 0,4, тогда как для вторых – 0,6. Все изученные породы характеризуются повышенными содержаниями CaO (от 4,68 до 4,93 мас. %), Na₂O (от 3,77 до 3,91 мас. %).

Структурно-морфологические особенности рудных тел. На Антиинском рудопроявлении руд-

ные тела представлены серией кварцевых жил мощностью от 0,1 до 9 м и протяженностью от 50 до 200 м. В пределах Антиинского массива известны и другие рудопроявления и пункты минерализации Au, Ag, Mo, W, где рудные тела также представлены мало мощными кварцевыми жилами, реже зонами березитизации.

Минеральный состав и последовательность формирования руд

Руды Антиинского рудопроявления характеризуются небольшим разнообразием минерального состава. К числу главных рудообразующих минералов относятся: пирит, галенит, буланжерит, к второстепенным – арсенопирит, к редким – гессит, эмпрессит, бенлеонардит и самородное золото. Структура руд мелко- и крупнозернистая, текстура вкрапленная, прожилково-вкрапленная и гнездово-вкрапленная. Количество рудных минералов не превышает 5 %. Нерудные минералы представлены главным образом кварцем, в меньшей степени серицитом. В отличие от руд Антиинского рудопроявления кварцевые жилы с сульфидной минерализацией, расположенные в южной части массива (пункты минерализации Au 48, 49), сложены теми же сульфидными минералами, только в меньшем проценте соотношении – количество рудных минералов редко превышает 1 %.

Типоморфные особенности минералов руд

Пирит является одним из наиболее ранних сульфидных минералов и образует редкую вкрапленность и прожилки в кварце. Он представлен хорошо ограниченными кристаллами кубического, реже пентагон-додекаэдрического габитуса. В сростаниях с пиритом установлен арсенопирит. Кристаллы пирита часто катаклазированы, а межзерновое пространство и трещины залечиваются более поздними сульфидами (буланжеритом и галенитом) (рис. 3, а), здесь же установлены единичные зерна самородного золота (рис. 3, б). Микрорентгеноспектральным анализом (19 определений) в пирите установлена постоянная примесь мышьяка до 0,81 мас. %, крайнее редко отмечается Ni до 0,27 мас. %. Другие элементы примеси, такие как кобальт и сурьма, ниже предела обнаружения.

Арсенопирит встречается в небольшом количестве и образует редкую вкрапленность в кварце. Он представлен изометричными, призматическими кристаллами с ромбовидным сечением.

Галенит представлен одиночными кристаллами, скоплениями зерен неправильной формы. Он образует вкрапленность и микропрожилки в кварце. В сростаниях с галенитом установлено самородное золото. В виде включений в галените обнаружены: гессит, эмпрессит, бенлеонардит, буланжерит и самородное золото. Микрорентгеноспектральным анализом (38 определений) в галените установлены постоянные примеси висмута до 1,27 мас. %, серебра до 0,83 мас. %, сурьмы до 0,33 мас. %, крайнее редко отмечается теллур до

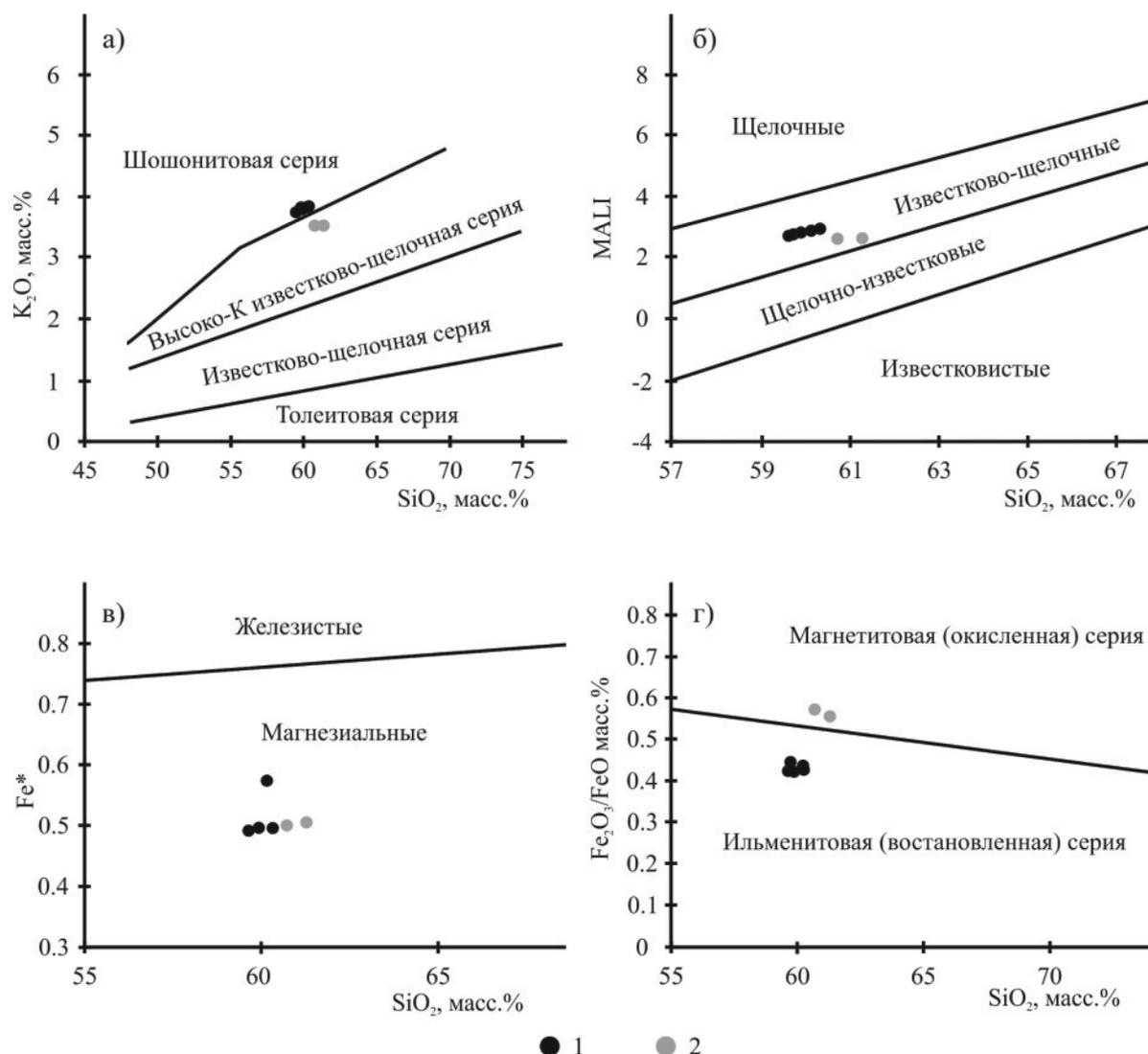


Рис. 2. Дискриминационные диаграммы: а) SiO₂-K₂O [8]; б) SiO₂-MALI ((Na₂O+K₂O)-CaO) [9]; в) SiO₂-Fe* (Fe*=FeO_v/(FeO_v+MgO)) [9]; г) SiO₂-Fe₂O₃/FeO [7]; 1 – кварцевые монцодиориты, развитые в северной части Антиинского массива (район Антиинского рудопроявления); 2 – кварцевые монцодиориты, развитые в юго-восточной части Антиинского массива (район пунктов минерализации Au 48, 49)

Fig. 2. Discrimination diagrams: а) SiO₂-K₂O [8]; б) SiO₂-MALI ((Na₂O+K₂O)-CaO) [9]; в) SiO₂-Fe* (Fe*=FeO_v/(FeO_v+MgO)) [9]; г) SiO₂-Fe₂O₃/FeO [7]; 1 are the quartz monzodiorites developed in the northern part of the Antiinsky massif (the area of the Antiinsky ore occurrence); 2 are the quartz monzodiorites developed in the southeastern part of the Antiinsky massif (points of mineralization Au 48, 49)

0,17 масс. % и селен до 0,11 масс. %. Другие элементы примеси, такие как германий, галлий, медь, индий, ниже предела обнаружения.

Буланжерит обнаружен в виде микропрожилков, гнезд и вкрапленности в кварце и представлен тонкопризматическими кристаллами (игльчатый) и ксеноморфными выделениями (рис. 3, в). Он часто по краям замещает галенит и является наиболее поздним сульфидным минералом. В виде включений в нем отмечается самородное золото. Микрорентгеноспектральным анализом (36 определений) в буланжерите установлены постоянные примеси висмута до 1,09 мас. %, мышьяка до 0,94 мас. %, реже серебра до 0,23 мас. %, крайне

редко отмечается ртуть до 0,19 мас. %. Другие элементы примеси, такие как марганец, железо, медь, теллур, цинк, кобальт, кадмий, никель, ниже предела обнаружения.

Гессит, эмпрессит и бенлеонардит установлены в виде округлых, удлиненных выделений в галените (рис. 3, г, д).

Самородное золото обнаружено в виде включений в буланжерите, галените, в трещинах и межзерновом пространстве пирита, а также в основной массе породы. Пробность самородного золота варьирует (по данным SEM) от 680 до 860 ‰, из примесей установлено только серебро. Более высокопробное (940 ‰) самородное золото характерно

для кварцевых жил с сульфидной минерализацией, расположенных в южной части Антиинского массива (район пунктов минерализации Au 48, 49).

Гипергенная минерализация. В приповерхностных условиях за счет окисления галенита образуется *англезит*. Буланжерит замещается *биндгеймитом* ($Pb_2Sb_2O_7$). При окислении пирита образуются *гидроокислы железа*. К гипергенным минералам нами также отнесен *ютенбогардит* ($AuAg_3S_2$), который образует каймы вокруг самородного золота (рис. 3, е).

Последовательность формирования руд

Результаты изучения структурно-текстурных взаимоотношений минералов в рудах месторождения позволили выделить в минералообразующем процессе две стадии минералообразования: пирит-арсенопиритовую и галенит-буланжеритовую с самородным золотом.

Результаты исследования изотопного состава серы сульфидных минералов приведены в табл. 2. Узкий диапазон колебаний вариации величин $\delta^{34}S$ (от 1,2 до 4,4 ‰) свидетельствует о гомогенном источнике серы. Небольшое утяжеление изотопного состава серы относительно ювенильной указывает на ее магматический источник [10, 11].

Таблица 2. Результаты исследования изотопного состава серы сульфидных минералов Антиинского рудопроявления

Table 2. Results of the study of sulfur isotopic composition of sulfide minerals of the Antiinsky ore occurrence

Минерал/Mineral	$\delta^{34}S$, ‰
Пирит/Pyrite	4,4
Галенит/Galena	3,9
	4,0
Буланжерит/Boulangerite	1,2
	3,6

Результаты исследования флюидных включений

Для термобарогеохимических исследований были отобраны образцы кварцевых жил Антиинского рудопроявления и пунктов минерализации Au 48, 49 (рис. 1). В образцах выделяются вкрапленная пирит-арсенопиритовая и прожилково-вкрапленная галенит-буланжеритовая минерализации. При проведении оптических наблюдений в прозрачно-полированных пластинках кварца можно выделить следующие типы флюидных

включений по фазовому составу: 1) газовой-жидкие углекислотные (различаются газовая фаза, жидкая углекислота и раствор) VLC (рис. 4, а, б); 2) многофазные (содержат газовую, жидкую и твердую фазы) VLS (рис. 4, в, г); 3) газовой-жидкие водные VL (рис. 4, д, е). Для изучения выбирались первичные и псевдотричные ФВ (классификация проводилась на основании критериев, изложенных в [12]). Первичные ФВ имеют изометричную форму или форму негативных кристаллов, их размеры варьируют в диапазоне 7–25 мкм. Они встречаются в виде индивидуальных включений или небольших групп. Псевдотричные ФВ характеризуются изометричной или неправильной формой, имеют размеры 4–18 мкм и трассируют залеченные трещины кристаллов кварца. Исследования ФВ проводились методами спектроскопии комбинационного рассеяния и криотермометрии, результаты которых приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты криотермометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния ФВ в кварце Антиинского рудопроявления и пунктов минерализации Au 48, 49

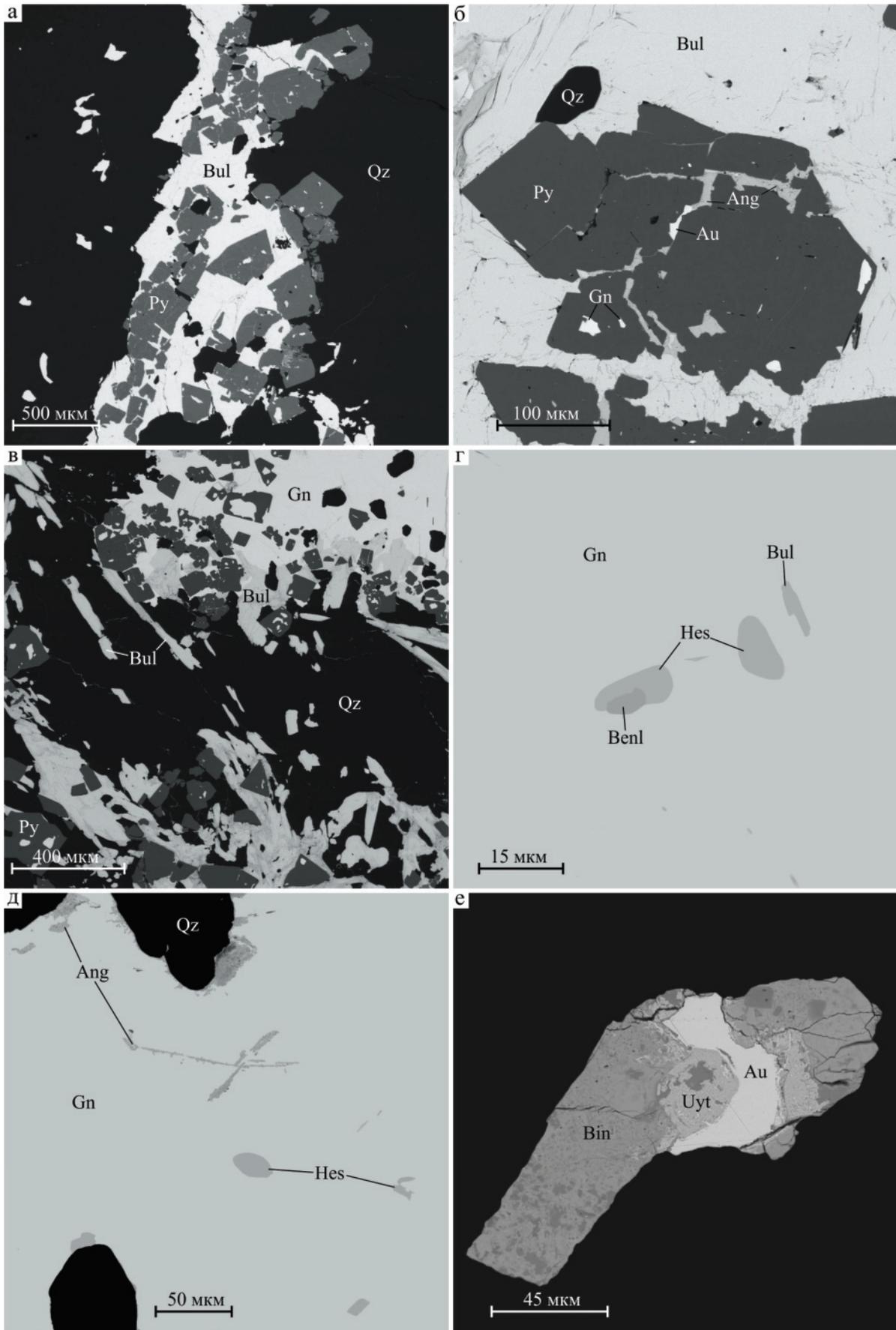
Table 3. Results of cryothermometry and Raman spectroscopy of fluid inclusions (FI) in quartz of Antiinsky ore occurrence and points of mineralization Au 48, 49

Объекты исследования Object of study	Вид ФВ/FI class	Тип ФВ/FI type	$T_{\text{гом.}}$, °C		Соленость, мас. % NaCl-экв. Salinity, wt. % NaCl-eq.	Состав газовой фазы Gaseous phase composition
			$T_{\text{гом.}}$	$T_{\text{гом.}}$		
Антиинское Antiinsky	П	VLC	280–340	25–30	н.о.	$CO_2+N_2\pm H_2S\pm CH_4$
	П	VLS	310–340	н.о.	н.о.	$CO_2+N_2\pm H_2S\pm CH_4$
	ПВ	VL	270–320	н.о.	4,9–6,4	$CO_2\pm N_2\pm CH_4$
Пункты минерализации Au 48, 49 Points of Au 48, 49 mineralization	П	VLC	310–330	30–31	н.о.	$CO_2\pm N_2\pm CH_4$
	П	VLS	320–340	н.о.	36–38	$CO_2\pm N_2\pm CH_4$
	ПВ	VL	270–330	н.о.	4,9	$CO_2\pm N_2\pm CH_4$

Антиинское рудопроявление. В составе газовой фазы первичных ФВ VLC (рис. 4, а) присутствует углекислота, иногда есть примесь азота, сероводорода и метана. Для таких включений установлены тем-

Рис. 3. Минеральный состав руд Антиинского рудопроявления: а) буланжерит цементирует кристаллы пирита; б) самородное золото, развитое по трещинам в пирите; в) буланжерит замещает по краям агрегаты галенита; г) включения бенлеонардита, гессита и буланжерита в галените; д) включение гессита в галените; е) самородное золото в биндгеймите. Примечание: Py – пирит; Gn – галенит; Bul – буланжерит; Hes – гессит; Benl – бенлеонардит; Au – самородное золото; Ang – англезит; Bin – биндгеймит; Uyt – ютенбогардит; Qz – кварц

Fig. 3. Mineral composition of Antiinsky ore occurrence: а) boulangerite cements pyrite crystals; б) native gold developed along cracks in pyrite; в) boulangerite replaces the aggregates of galena at the edges; г) inclusions of benleonardite, hessite and boulangerite in galena; д) inclusion of hessite in galena; е) native gold in bindheimite. Notes: Py – pyrite; Gn – galena; Bul – boulangerite; Hes – hessite; Benl – benleonardite; Au – native gold; Ang – anglesite; Bin – bindheimite; Uyt – yutenbogaardite; Qz – quartz



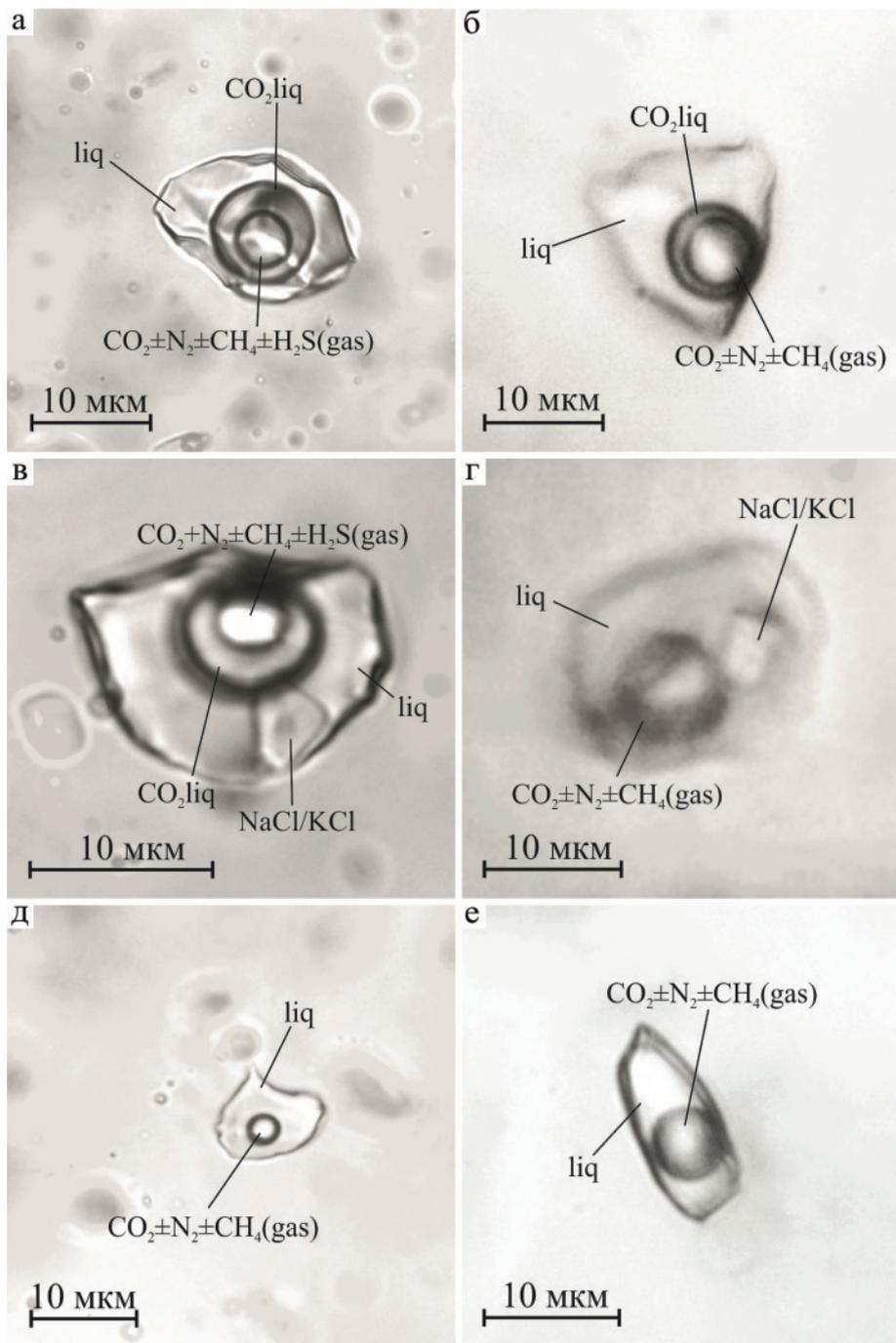


Рис. 4. Флюидные включения в кварце Антиинского рудопроявления (а, в, д) и пунктов минерализации Au 48, 49 (б, г, е)

Fig. 4. Fluid inclusions in quartz of Antiinsky ore occurrence (a, v, d) and points of Au 48, 49 mineralization (б, г, е)

температуры гомогенизации CO_2 ($T_{\text{гом. CO}_2}$) (в жидкость) 25–30 °С и температуры полной гомогенизации ($T_{\text{гом.}}$) (в жидкость) 280–340 °С. По полученным температурам рассчитана плотность CO_2 0,6–0,7 г/см³ и давление 2–2,7 кбар. В первичных ФВ VLS (рис. 4, в) газовая фаза представлена смесью углекислоты и азота ($\pm\text{CH}_4\pm\text{H}_2\text{S}$). Кроме солевого раствора во включениях присутствует жидкая углекислота. Минеральная фаза по оптическим наблюдениям светлоокрашенная изотропная кубической морфологии,

вероятно, является хлоридом. ФВ VLS гомогенизируются в интервале температур 310–340 °С. Состав газовой фазы псевдоторичных ФВ VL (рис. 4, д) $\text{CO}_2\pm\text{N}_2\pm\text{H}_2$. Температуры гомогенизации (в жидкость) ложатся в интервал от 270 до 320 °С. По данным криометрии температуры плавления льда –4...–3 °С, соленость соответственно 4,9–6,4 мас. % NaCl-экв.

Пункты минерализации Au 48, 49. Первичные ФВ VLC (рис. 4, б) в газовой фазе содержат углекис-

слоту, примесь азота и метана. Температуры гомогенизации CO_2 (в жидкость) $30\text{--}31^\circ\text{C}$, полная гомогенизация (в жидкость) включений происходит в интервале температур $310\text{--}330^\circ\text{C}$. Рассчитанная плотность углекислоты $0,5\text{--}0,6\text{ г/см}^3$, давление $2\text{--}2,5$ кбар. Первичные ФВ VLS (рис. 4, з) содержат газообразную CO_2 , с примесью азота и метана. Твердая фаза, скорее всего, представлена хлоридом (светлоокрашенная, изотропная, кубический кристалл). Температуры гомогенизации от 320 до 340°C . Газовая фаза псевдотричных ФВ VL (рис. 4, е) представлена углекислотой, с примесью азота и метана. ФВ такого типа гомогенизируются (в жидкость) при температурах $270\text{--}300^\circ\text{C}$. Получены температуры плавления льда около -3°C и соленость $\approx 4,9$ мас. % NaCl-экв.

Обсуждение результатов

В ходе проведенных исследований по Антиинскому рудопроявлению, а также по некоторым пунктам минерализации Au, расположенным в пределах одноименного массива, были получены данные, позволяющие предположить их генетическую близость с типовыми месторождениями класса «IRGS». Одним из главных факторов, влияющих на размещение и специфику золоторудной минерализации для золоторудных месторождений класса «IRGS», является различие в химическом составе магмы и степени ее окисления [13]. Полученные данные о петрохимическом составе магматических пород Антиинского массива, а именно низкие отношения $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ ($<0,5$) для кварцевых монцодиоритов (отобранных в районе Антиинского рудопроявления), позволяют отнести их к ильменитовой (восстановленной) серии. Несколько завышенное отношение $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ ($0,6$), установленное для кварцевых монцодиоритов из юго-восточной части массива, на наш взгляд объясняется тем, что магматические породы сильнее затронуты экзогенными процессами. В таком случае Fe^{2+} , входящее в состав таких минералов, как биотит, роговая обманка и клинопироксен, в поверхностных условиях будет окисляться и переходить в Fe^{3+} , а также будет снижаться содержание K_2O , что мы и наблюдаем для этих пород в сравнении с кварцевыми монцодиоритами, развитыми в северной части массива (отобранными из канав). Магматические породы Антиинского массива характеризуются высокими содержаниями CaO (от $4,68$ до $4,93$ мас. %), Na_2O (от $3,77$ до $3,91$ мас. %) и являются пералюминиевыми, магнезиальными, высококалиевыми гранитоидами. Полученные данные позволяют предположить, что магматические породы Антиинского массива наиболее близки к высококалиевому I-типу гранитоидов. С восстановленными гранитоидами в современной зарубежной литературе связывают формирование двух типов золоторудных месторождений: «reduced porphyry copper-gold deposit» (RPCG) (золото-медно-порфиновые месторождения, связанные с восстановленными интрузия-

ми) [14] и «reduced intrusion-related gold deposit» (RIRGD) (золоторудные месторождения, связанные с восстановленными интрузиями). Немаловажной чертой для золоторудных месторождений «RPCG» и «RIRGD» является минеральный состав и геохимический профиль руд. В целом в пределах Антиинского массива установлены различные по своим масштабам рудопроявления и пунктам минерализации следующих металлов: Au, Ag, W, Mo, а также отмечаются повышенные содержания Pb, Sb, As, Bi. Проведенные нами исследования минерального состава Антиинского рудопроявления и пунктов минерализации Au 48, 49 показали, что основными рудными минералами для них являются: пирит, арсенопирит, галенит и буланжерит. Детальные исследования минерального состава позволяют наметить геохимический профиль руд: Au, Ag, As, Pb, Sb. Такой геохимический профиль руд, а также морфология рудных тел (преимущественно жильная) характерны для дистальных золоторудных месторождений «RIRGD» [15, 16].

Термобарогеохимические исследования ФВ кварцевых жил Антиинского рудопроявления и пунктов минерализации Au 48, 49 показали, что их формирование происходило в схожих физико-химических условиях. Образование ранней вкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализации шло из восстановленных углекислотных среднетемпературных хлоридных растворов на глубине $8\text{--}10,5$ км. Позднее рудоносный флюид эволюционировал: снизились содержание углекислоты и соленость флюида. Прожилково-вкрапленная галенит-буланжеритовая минерализация формировалась из восстановленных среднетемпературных слабосоленых растворов, вероятно, в условиях низких давлений. Полученные данные об условиях формирования руд – высокие температуры начала рудообразующего процесса, наличие хлоридных растворов, снижение солености от ранних к поздним ассоциациям, широкое распространение диоксида углерода в газовой фазе, а также наличие газов «восстановителей» азота, метана, сероводорода, являются характерными чертами для золоторудных месторождений «RIRGD» [17–19]. Локализация рудных тел в пределах массива, проявления процессов березитизации, а также данные об изотопном составе сульфидных минералов в совокупности с термобарогеохимическими исследованиями позволяют предположить не только пространственную, но и генетическую связь рудной минерализации с магматическими породами Антиинского массива. Пространственно-генетическая связь рудной минерализации и магматических пород шахтаминского комплекса установлена для многих других месторождений в пределах Восточного Забайкалья [20–23]. Полученные данные позволяют сделать вывод о принадлежности Антиинского рудопроявления к золоторудным месторождениям, связанным с восстановленными интрузиями «RIRGD».

Выводы

1. Проведенные исследования показали, что Антиинское рудопоявление относится к золото-рудным месторождениям, связанным с восстановленными интрузиями «RIRGD».
2. Рудные тела представлены главным образом кварцевыми жилами с пиритом, галенитом, буланжеритом и арсенопиритом. Впервые для рудопоявления установлены следующие сульфидные минералы: гессит, эмпрессит и бенлеонардит. Выделяется две стадии минералообразования: пирит-арсенопиритовая и галенит-буланжеритовая с самородным золотом.
3. Изотопный состав серы сульфидных минералов свидетельствует о гомогенном (магматическом) источнике серы рудных минералов.
4. Магматические породы Антиинского массива представлены кварцевыми монцодиоритами и

являются пералюминиевыми, магнезиальными, высококалийными, восстановленными гранитоидами (I-типа).

5. Формирование ранней вкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализации шло из восстановленных углекислотных среднетемпературных хлоридных растворов на глубине 8–10,5 км. В процессе эволюции рудоносного флюида снижалось содержание углекислоты и соленость. Поздняя прожилково-вкрапленная галенит-буланжеритовая минерализация (с самородным золотом) формировалась из восстановленных среднетемпературных слабосоленых растворов, вероятно, в условиях низких давлений.

Работа выполнена в рамках Государственного задания, проект № 0330–2016–0001, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16–35–00253.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kozlov V.D. Trace-element composition and origin of granitoids from the Shakhtama complex and Kukul'bei rare-metal complex (Aga zone, Transbaikalia) // Russian Geology and Geophysics. – 2011. – V. 52. – Iss. 5. – P. 526–536.
2. Спиридонов А.М., Зорина Л.Д., Китаев Н.А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. – Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2006. – 291 с.
3. Pirajno F. Hydrothermal processes and mineral systems. – London: Springer, 2009. – 1250 p.
4. Hart C.J.R. Reduced intrusion-related gold systems // Mineral Deposits of Canada: a synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication. – 2007. – V. 5. – P. 95–112.
5. Sillitoe R.H. Gold-rich porphyry copper deposits: Geological model and exploration implications // Mineral Deposit Modeling, Geological Association of Canada. – 1993. – Special Paper 40. – P. 465–478.
6. Sillitoe R.H., Thompson J.F.H. Intrusion-related vein gold deposits: types, tectono-magmatic settings and difficulties of distinction from orogenic gold deposits // Resource Geology. – 1998. – V. 48. – P. 237–250.
7. Ishihara S., Chappell B.W. Petrochemistry of I-type magnetite-series granitoids of the northern Chile, Highland Valley, southern B.C. Canada, Erdenet mine, Mongolia, Dexing mine, China, Medet mine, Bulgaria, and Ani mine, Japan // Bulletin of the Geological Survey of Japan. – 2010. – V. 61 (11/12). – P. 383–415.
8. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1976. – V. 58. – № 1. – P. 63–81.
9. A geochemical classification for granitic rocks / B.R. Frost, C.G. Barnes, W.J. Collins, R.J. Arculus, D.J. Ellis, C.D. Frost // Journal of Petrology. – 2001. – V. 42. – № 11. – P. 2033–2048.
10. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. – Berlin: Springer, 2015. – 389 p.
11. Seal II R.R. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals // Reviews in Mineralogy. and Geochemistry. – 2006. – V. 61. – № 1. – P. 633–677.
12. Roedder E. Fluid inclusions: Reviews in Mineralogy. – Washington: Mineralogical Society of America, 1984. – 644 p.
13. Hart C.J.R., Baker T., Burke M. New exploration concepts for country-rock-hosted, intrusion-related gold systems: Tintina gold belt in Yukon // The Tintina gold belt: concepts, exploration

and discoveries. British Columbia and Yukon Chamber of Mines. – 2000. – Special V. 2. – P. 145–172.

14. Rowins S.M. Reduced porphyry copper-gold deposits: a newly recognized style of gold mineralization // Geological Society of America Abstracts with Program. – 1999. – V. 31. – № 7. – A 92.
15. Baker T., Lang J.R. Geochemistry of hydrothermal fluids associated with intrusion-hosted gold mineralization, Yukon Territory // Mineral Deposits: processes to processing: Proc. of the Fifth Biennial SGA Meeting and Tenth Quadrennial IAGOD Symposium. – London, 1999. – P. 17–20.
16. Newberry R.J. Mineral deposits and associated Mesozoic and Tertiary igneous rocks within the Interior Alaska and adjacent Yukon portions of the «Tintina gold belt»: a progress report // The Tintina gold belt: concepts, exploration and discoveries. British Columbia and Yukon Chamber of Mines. – 2000. – Special V. 2. – P. 59–88.
17. Baker T., Lang J.R. Fluid inclusion characteristics of intrusion-related gold mineralization, Tombstone-Tungsten magmatic belt, Yukon Territory, Canada // Mineralium Deposita. – 2001. – V. 36. – P. 563–582.
18. An exploration model for intrusion-related gold systems / J.R. Lang, T. Baker, C.J.R. Hart, J.K. Mortensen // Society of Economic Geologists. – 2000. – Newsletter 40. – P. 1–15.
19. Plutonic-related gold deposits of interior Alaska / D. McCoy, R.J. Newberry, P. Layer, J.J. DiMarchi, A. Bakke, J.S. Masterman, D.L. Minehane // Economic Geology. – 1997. – Monograph 9. – P. 191–241.
20. The large Bystrinskoe Cu-Au-Fe deposit (eastern trans-Baikal region): Russia's first example of a skarn-porphyry ore-forming system related to adakite / V.A. Kovalenker, S.S. Abramov, G.D. Kiseleva, T.I. Krylova, Y.I. Yazykova, N.S. Bortnikov // Doklady Earth Sciences. – 2016. – V. 468. – Iss. 2. – P. 566–570.
21. Redin Yu.O., Dultsev V.F., Nevolko P.A. Gold-bismuth mineralization of the Lugokan ore field (Eastern Transbaikalia): age, mineral composition and relationship with magmatism // Ore Geology Review. – 2015. – V. 70. – P. 228–240.
22. New data on the age of gold mineralization of the Lugokan ore cluster (Eastern Transbaikalia) / Yu.O. Redin, V.F. Dultsev, P.A. Nevolko, A.V. Ponomarchuk // Doklady Earth Sciences. – 2016. – V. 469. – Iss. 2. – P. 851–854.
23. The Zhireken porphyry Mo ore-magmatic system (Eastern Transbaikalia): U-Pb age, sources, and geodynamic setting / A.P. Berzina, A.N. Berzina, V.O. Gimon, V.Y. Kiseleva, S.V. Paleskii, T.B. Bayanova, R.S. Krymskii, E.N. Lepekhina // Russian Geology and Geophysics. – 2015. – V. 5. – № 3. – P. 446–465.

Поступила 18.12.2017 г.

Информация об авторах

Редин Ю.О., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Редина А.А., младший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Мокрушников В.П., инженер Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Дульцев В.Ф., младший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

UDC 553.41(571.55)

ANTIINSKY ORE OCCURRENCE AS AN EXAMPLE OF ORE-FORMING SYSTEMS RELATED TO REDUCED INTRUSIONS (EASTERN TRANSBAIKALIA)

Yury O. Redin¹,
redin@igm.nsc.ru

Anna A. Redina¹,
redina@igm.nsc.ru

Victor P. Mokrushnikov¹,
viktorm@igm.nsc.ru

Vladislav F. Dultsev¹,
dultsev@igm.nsc.ru

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS,
3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

Relevance: to reveal the genetic relationship of ore mineralization with late Jurassic magmatic rocks of the Shakhtama complex for Antiinsky ore occurrence as example.

The aim of the research is to determine the genesis of the Antiinsky ore occurrence relying on petrographic, petrochemical, mineralogical-geochemical, isotopic and physicochemical studies.

Objects: Antiinsky ore occurrence, as well as some smaller mineralization sites localized within the massif of the same name in the Shakhtama complex.

Methods. Mineral composition, texture, structural features, inter-relations between individual minerals were studied with an optical microscope in the reflected and transmitted light. Monomineral fractions of sulfides were collected under a binocular from crushed samples and sulfide concentrates. Chemical composition of sulfide minerals and native gold was analyzed in polished discs using the X-ray spectral method with a JEOL JXA-8100 instrument, as well as by means of scanning electron microscopy (SEM) with a JSM-6510 instrument equipped with an energy-dispersive spectrometer (EDS) of OXFORD company. The isotope composition of sulfur in sulfide minerals was determined in the Center for Multielement and Isotope studies, SB RAS (Novosibirsk). The error of $\delta^{34}\text{S}_{\text{DT}}$ determination (1σ) was 0,1 ‰. Fluid inclusions were studied in transparent polished plates by means of cryothermometry and Raman spectroscopy. Cryothermometric studies were carried out in a THMSG-600 micro thermochamber of Linkam company. The composition of the gas phase of fluid inclusions was studied by means of Raman spectroscopy using a Ramanor U-1000 spectrometer and a Horiba DU420E-OE-323 detector of Jobin Yvon company, Millennia Pro laser of Spectra-Physics company; Confocal Raman Microscope alpha 300R of WITec company. Analysis of petrogenic components (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , P_2O_5 , Na_2O , K_2O , H_2O , LOI) in magmatic rocks was carried out by the method of silicate analysis in the Chemical Group of the Center for Geodynamics and Geochronology at the Institute of Earth Crust, SB RAS (Irkutsk).

Results. The Antiinsky ore occurrence is situated in the Aginsky tectonic zone of Eastern Transbaikalia and is related to the massif of the same name in the Shakhtama complex. The authors have studied the mineral composition of ores using the modern methods, revealed and characterized the major mineral associations. The paper introduces the detailed data on chemical composition of native gold, sulfide minerals and their isotope composition. It is established that the major productive mineral association is galena-boulangerite with native gold. The results of the studies of sulfur isotope composition of sulfide minerals provide the evidence of the magmatic source of sulfur in ore minerals. The petrographic and petrochemical studies showed that the magmatic rocks of the Antiinsky massif are peraluminium, magnesian, high-potassium reduced granitoids. The obtained data allow us to assume that the magmatic rocks of the Antiinsky massif are the closest ones to high-potassium I-type of granitoids. The fluid inclusion studies of vein quartz from the Antiinsky ore occurrence and the points of mineralization Au 48, 49 showed that their formation took place under similar physicochemical conditions. The formation of early impregnated pyrite-arsenopyrite mineralization proceeded from reduced carbon-dioxide medium-temperature chloride solutions at a depth of 8–10,5 km. Later on, the ore-bearing fluid evolved: the concentration of carbon dioxide and the salinity of the fluid decreased. The veinlet-impregnated galena-boulangerite mineralization was formed from reduced medium-temperature light-salted solutions, probably under the low-pressure conditions. The data obtained allow us to conclude that the Antiinsky ore occurrence is a reduced intrusion-related gold deposit.

Key words:

Gold ore deposits, relationship with magmatism, mineral composition, formation conditions, Eastern Transbaikalia.

This study was conducted under the state assignment projects of IGM SB RAS (№ 0330–2016–0001), and was funded by RFBR according to the research project No. 16–35–00253.

REFERENCES

1. Kozlov V.D. Trace-element composition and origin of granitoids from the Shakhtama complex and Kukul'bei rare-metal complex (Aga zone, Transbaikalia). *Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, Iss. 5, pp. 526–536.
2. Spiridonov A.M., Zorina L.D., Kitaev N.V. *Zolotonosnye rudno-magmaticheskie sistemy Zabaykalya* [Gold-bearing Ore-magmatic Systems of Transbaikalia]. Novosibirsk, Academic publishing house «GEO», 2006. 291 p.
3. Pirajno F. *Hydrothermal processes and mineral systems*. London, Springer, 2009. 1250 p.

4. Hart C.J.R. Reduced intrusion-related gold systems. Mineral Deposits of Canada: a synthesis of Major deposit types, district metallogeny, the Evolution of geological provinces, and exploration methods: *Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication*, 2007, vol. 5, pp. 95–112.
5. Sillitoe R.H. Gold-rich porphyry copper deposits: Geological model and exploration implications. *Mineral Deposit Modeling, Geological Association of Canada*, 1993, Special Paper 40, pp. 465–478.
6. Sillitoe R.H., Thompson J.F.H. Intrusion-related vein gold deposits: types, tectono-magmatic settings and difficulties of distinction from orogenic gold deposits. *Resource Geology*, 1998, vol. 48, pp. 237–250.
7. Ishihara S., Chappell B.W. Petrochemistry of I-type magnetite-series granitoids of the northern Chile, Highland Valley, southern B.C. Canada, Erdenet mine, Mongolia, Dexing mine, China, Medet mine, Bulgaria, and Ani mine, Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 2010, vol. 61 (11/12), pp. 383–415.
8. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, vol. 58, no. 1, pp. 63–81.
9. Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 2001, vol. 42, no. 11, pp. 2033–2048.
10. Hoefs J. *Stable isotope geochemistry*. Berlin, Springer, 2015. 389 p.
11. Seal II R.R. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, vol. 61, no. 1, pp. 633–677.
12. Roedder E. *Fluid inclusions: Reviews in Mineralogy*. Washington, Mineralogical Society of America, 1984. 644 p.
13. Hart C.J.R., Baker T., Burke M. New exploration concepts for country-rock-hosted, intrusion-related gold systems: Tintina gold belt in Yukon. The Tintina gold belt: concepts, exploration and discoveries. *British Columbia and Yukon Chamber of Mines*, 2000, sp. vol. 2, pp. 145–172.
14. Rowins S.M. Reduced porphyry copper-gold deposits: a newly recognized style of gold mineralization. *Geological Society of America Abstracts with Program*, 1999, vol. 31, no. 7, A 92.
15. Baker T., Lang J.R. Geochemistry of hydrothermal fluids associated with intrusion-hosted gold mineralization, Yukon Territory. *Mineral Deposits: processes to processing. Proceedings of the Fifth Biennial SGA Meeting and Tenth Quadrennial IA GOD Symposium*. London, 1999. pp. 17–20.
16. Newberry R.J. Mineral deposits and associated Mesozoic and Tertiary igneous rocks within the Interior Alaska and adjacent Yukon portions of the «Tintina gold belt»: a progress report. The Tintina gold belt: concepts, exploration and discoveries. *British Columbia and Yukon Chamber of Mines*, 2000, sp. vol. 2, pp. 59–88.
17. Baker T., Lang J.R. Fluid inclusion characteristics of intrusion-related gold mineralization, Tombstone-Tungsten magmatic belt, Yukon Territory, Canada. *Mineralium Deposita*, 2001, vol. 36, pp. 563–582.
18. Lang J.R., Baker T., Hart C.J.R., Mortensen J.K. An exploration model for intrusion-related gold systems. *Society of Economic Geologists*, 2000, Newsletter 40, pp. 1–15.
19. McCoy D., Newberry R.J., Layer P., DiMarchi J.J., Bakke A., Masterman J.S., Minehane D.L. Plutonic-related gold deposits of interior Alaska. *Economic Geology*, 1997, Monograph 9, pp. 191–241.
20. Kovalenker V.A., Abramov S.S., Kiseleva G.D., Krylova T.I., Yazykova Y.I., Bortnikov N.S. The large Bystrinskoe Cu-Au-Fe deposit (eastern trans-Baikal region): Russia's first example of a skarn-porphyry ore-forming system related to adakite. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 468, Iss. 2, pp. 566–570.
21. Redin Yu.O., Dultsev V.F., Nevolko P.A. Gold-bismuth mineralization of the Lugokan ore field (Eastern Transbaikalia): Age, mineral composition and relationship with magmatism. *Ore Geology Review*, 2015, vol. 70, pp. 228–240.
22. Redin Yu.O., Dultsev V.F., Nevolko P.A., Ponomarchuk A.V. New data on the age of gold mineralization of the Lugokan ore cluster (Eastern Transbaikalia). *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 469, Iss. 2, pp. 851–854.
23. Berzina A.P., Berzina A.N., Gimov V.O., Kiseleva V.Y., Paleskii S.V., Bayanova T.B., Krymskii R.S., Lepekhina E.N. The Zhireken porphyry Mo ore-magmatic system (Eastern Transbaikalia): U-Pb age, sources, and geodynamic setting. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 446–465.

Received: 18 December 2017.

Information about the authors

Yury O. Redin, Cand. Sc., researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS.

Anna A. Redina, junior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS.

Victor P. Mokrushnikov, engineer, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS.

Vladislav F. Dultsev, junior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS.

УДК 532.329; 532.2.532

ИНИЦИИРОВАНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ТРУБЕ С НЕОДНОРОДНЫМ ПО СЕЧЕНИЮ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПУЗЫРЬКОВ

Гималтдинов Ильяс Кадирович¹,

iljas_g@mail.ru

Баязитова Алина Разифовна²,

stlina@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

² Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,
Россия, 453103, г. Стерлитамак, пр. Ленина, 49.

Актуальность. Распространение детонационной волны в пузырьковой жидкости – уникальное явление, потому что пузырьковая детонация инициируется и распространяется в системах с очень малым энергосодержанием, но при этом обладает общими для всех детонационных волн признаками (самоподдерживающийся стационарный процесс). Так как пузырьковые среды структурно отличаются от химически активных гомогенных сред (жидких, газообразных, твердых взрывчатых веществ) и гетерогенных (газ-частицы, пена и т. д.), то детонация в пузырьковых средах обладает рядом особенностей, связанных со спецификой пузырьковой среды. Пузырьковые жидкости являются рабочей средой в различных отраслях промышленности, связанных с нефтепереработкой, металлургией и т. д. В одних случаях пузырьковые жидкости являются рабочей средой для ведения технологических процессов (например, жидкофазное окисление различных газов), в других – элементом системы обеспечения взрывобезопасности (предохранительные жидкостные затворы), поэтому необходима разработка научных принципов выбора взрывобезопасных режимов технологических процессов, протекающих в газожидкостных средах, и эксплуатации жидкостных предохранительных затворов.

Цель: изучение особенностей инициирования и распространения детонации в пузырьковой жидкости при неоднородном распределении по сечению трубы взрывчатых пузырьков.

Объект: пузырьковые жидкости, содержащие взрывчатый газ внутри пузырьков.

Методика исследования основывается на решении системы дифференциальных уравнений в частных производных.

Результаты исследования показали, что неоднородное распределение взрывчатых пузырьков по сечению трубы приводит к существенному снижению амплитуды первоначальной волны, способной инициировать детонацию. Кроме того, установлено, что при распространении детонационной волны из-за поджатия остаются участки, где детонация не происходит.

Ключевые слова:

Двумерность, детонация, волна, пузырьки, жидкость, газ.

Введение

Детонация – самоподдерживающийся (автоволновой) процесс, существующий в химически активных средах. Возможность существования детонационного процесса обеспечивается энерговыделением в среде, компенсирующим энергозатраты детонации на необратимое преобразование среды. Детонационная волна в пузырьковой жидкости – это комплекс, состоящий из ударной волны, распространяющейся с определенной скоростью, и зоны химических реакции за ней. Волна пузырьковой детонации существует в химически активных средах, например, газожидкостная смесь с взрывчатым газом внутри пузырьков.

Интерес исследователей к изучению волн пузырьковой жидкости не уменьшается, что связано с некоторыми парадоксальными явлениями при распространении волн в таких системах [1–8]. В настоящее время наряду с исследованием одномерных волн в пузырьковых жидкостях активно изучаются двумерные волны. В [9] изучена эволюция нелинейных волн давления в трубе при разных законах распределения пузырьков по сечению. В [10–14] исследована динамика детонационных

волн в трубе, содержащей пузырьковые кластеры различной геометрии.

Из экспериментов и математических моделей по пузырьковой детонации известно, что для инициирования детонации необходимо воздействовать на пузырьковую жидкость импульсом давления амплитудой около 2,0 МПа. Это справедливо в случае, когда пузырьки расположены в объеме жидкости равномерно. Но, как показывают расчеты для ацетилено-кислородной стехиометрической смеси $C_2H_2 + 2,5O_2$, приведенные в [11], когда взрывчатые пузырьки расположены в объеме в виде пузырьковой завесы конечных размеров, воздействие давлением амплитудой 4–5 атмосфер на границу жидкости из-за фокусировки волны в области пузырьковой завесы приводит к инициированию детонации. Таким образом, распределение пузырьков в объеме жидкости в виде пузырьковой завесы приводит к значительному уменьшению диапазона амплитуд первоначальной волны, способного инициировать детонацию.

В данной работе исследованы особенности инициирования и распространения детонации в пузырьковой жидкости при неоднородном распреде-

лении взрывчатых пузырьков по сечению трубы. Показано, что неоднородность объемного содержания пузырьков может привести к существенному снижению амплитуды первоначальной волны, способной инициировать детонацию.

Постановка задачи

Исследуем волны давления в трубе, заполненной пузырьковой жидкостью, при неравномерном распределении объемного содержания взрывчатого газа вдоль радиальной координаты. Рассмотрим два случая: когда объемное содержание газа монотонно увеличивается к центру трубы по линейному закону, и, наоборот, когда объемное содержание пузырьков увеличивается от центра трубы к периферии.

Будем полагать, что температура газа внутри пузырьков при достижении некоторого значения T_* мгновенно изменяется на величину ΔT , соответствующую теплотворной способности газа, вследствие чего давление в газе и жидкости повышается.

Для описания волнового движения запишем систему, состоящую из уравнений масс, числа пузырьков, импульсов и давления в пузырьках [10, 15]

$$\frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \frac{v_r}{r} + \rho_i \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0, (i = l, g),$$

$$\frac{dn}{dt} + n \frac{v_r}{r} + n \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0,$$

$$\rho_l^0 \frac{dv_r}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial r} = 0, \quad \rho_l^0 \frac{dv_z}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{dp_g}{dt} = -\frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma-1)}{a} q,$$

$$w = \frac{da}{dt}, \quad \left(\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_r \frac{\partial}{\partial r} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \right),$$

$$\alpha_l + \alpha_g = 1, \quad \alpha_g = 4/3\pi n a^3, \quad \rho_l = \rho_l^0 \alpha_l, \quad \rho = \rho_g + \rho_l.$$

Все обозначения такие же, как в [10].

При описании радиального движения учитывается акустическое излучение от пузырьков, поэтому будем полагать, что $w = w_A + w_R$ [16]:

$$a \frac{dw_R}{dt} + \frac{3}{2} w_R^2 + 4\nu_l \frac{w_R}{a} = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0}, \quad w_A = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0 C_l \alpha_g^{1/3}},$$

где ν_l – вязкость жидкости; C_l – скорость звука в «чистой» жидкости.

Для описания жидкости и газа примем следующие уравнения

$$p_l = p_0 + C_l^2 (\rho_l^0 - \rho_{l0}), \quad p_g = \rho_g^0 B T_g,$$

где B – газовая постоянная. Индекс 0 внизу относится к начальному состоянию.

Тепловой поток q_g задается приближенным конечным соотношением [15]

$$q_g = \text{Nu}_g \lambda_g \frac{T_g - T_0}{2a}, \quad \frac{T_g}{T_0} = \frac{p_g}{p_0} \left(\frac{a}{a_0} \right)^3,$$

$$\text{Nu}_g = \begin{cases} \sqrt{\text{Pe}_g}, & \text{Pe}_g \geq 1004; \\ 10, & \text{Pe}_g < 100, \end{cases}$$

$$\text{Pe}_g = 12(\gamma-1) \frac{T_0}{|T_g - T_0|} \frac{a |w|}{\kappa_g}, \quad k_g = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_g}.$$

Здесь $T_0 = \text{const}$ – температура жидкости; Nu и Pe – числа Нуссельта и Пекле; k_g и λ_g – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности газов; c_g – теплоемкость газа.

В качестве газовой фазы для расчетов принимается ацетилено-кислородная стехиометрическая смесь $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2$ [1], значения T_* и ΔT получены в [11] с учетом [17].

Результаты расчетов

Исследуем динамику детонационных волн в неоднородной по объемному содержанию взрывчатого газа пузырьковой жидкости. Методика численного расчета представлена в [11, 18].

Для того, чтобы выделить область, где произошла химическая реакция в газовой фазе, при численных расчетах был введен индикатор, который в дальнейшем будем называть индикатором детонации.

На рис. 1 представлен случай инициирования волн детонации при неоднородном распределении взрывчатых пузырьков по сечению трубы, когда объемное содержание пузырьков увеличивается от стенки к оси трубы линейно от $\alpha_{g0}^w = 0,001$ до $\alpha_{g0}^c = 0,07$ по закону $\alpha_{g0} = \left(\frac{\alpha_{g0}^w - \alpha_{g0}^c}{R_w - 1} \right) r + \alpha_{g0}^c$.

Остальные начальные условия при этом записываются в следующем виде: ($t=0$), $z>0$:

$$p_l = p_0, \quad v_r = v_z = 0, \quad \rho_l = \rho_{l0}^0,$$

$$\rho = \rho_{l0}^0 (1 - \alpha_{g0}), \quad p_g = p_0, \quad a = a_0, \quad w = 0.$$

На оси симметрии ($r_0=0$) и стенке трубы ($r_0=R_c$) принимаются условия равенства нулю нормальной компоненты скорости $v_r=0$.

Возмущение давления инициируется скачком давления на границе $z_0=0$, $0 \leq r_0 \leq R_c$, которое задается следующим выражением: $p_{l0} = p_0 + \Delta p_0$, $t > 0$.

Поля давления (а), (б), (е) и (ф) и поля для индикатора детонации (с), (д), (г) и (h) (рис. 1) соответствуют моментам времени $t=0,7; 0,8; 1,0$ и $1,1$ мс. Отметим, что черный цвет в поле для индикатора детонации соответствует зоне, где химическая реакция в газовой фазе уже произошла. Как видно из картинок (а) и (с), к моменту 0,7 мс происходит фокусировка волн давления к центру трубы из-за более сильной сжимаемости этой области, что обусловлено более высоким объемным содержанием пузырьков в центре трубы. Амплитуда волны достигает значения $\sim 1,6$ МПа, но этого недостаточно для инициирования детонации, т. е. температура в пузырьках не достигает критического значения T_* и детонации к этому моменту времени не происходит. Из картинок (б) и (д) видно, что к моменту 0,8 мс инициируется детонационная волна, которая распространяется вдоль оси трубы с амплитудой $\sim 4,5$ МПа. Из картинок (е) и (г), соответствующих моменту 1,0 мс, видно, что детонационная

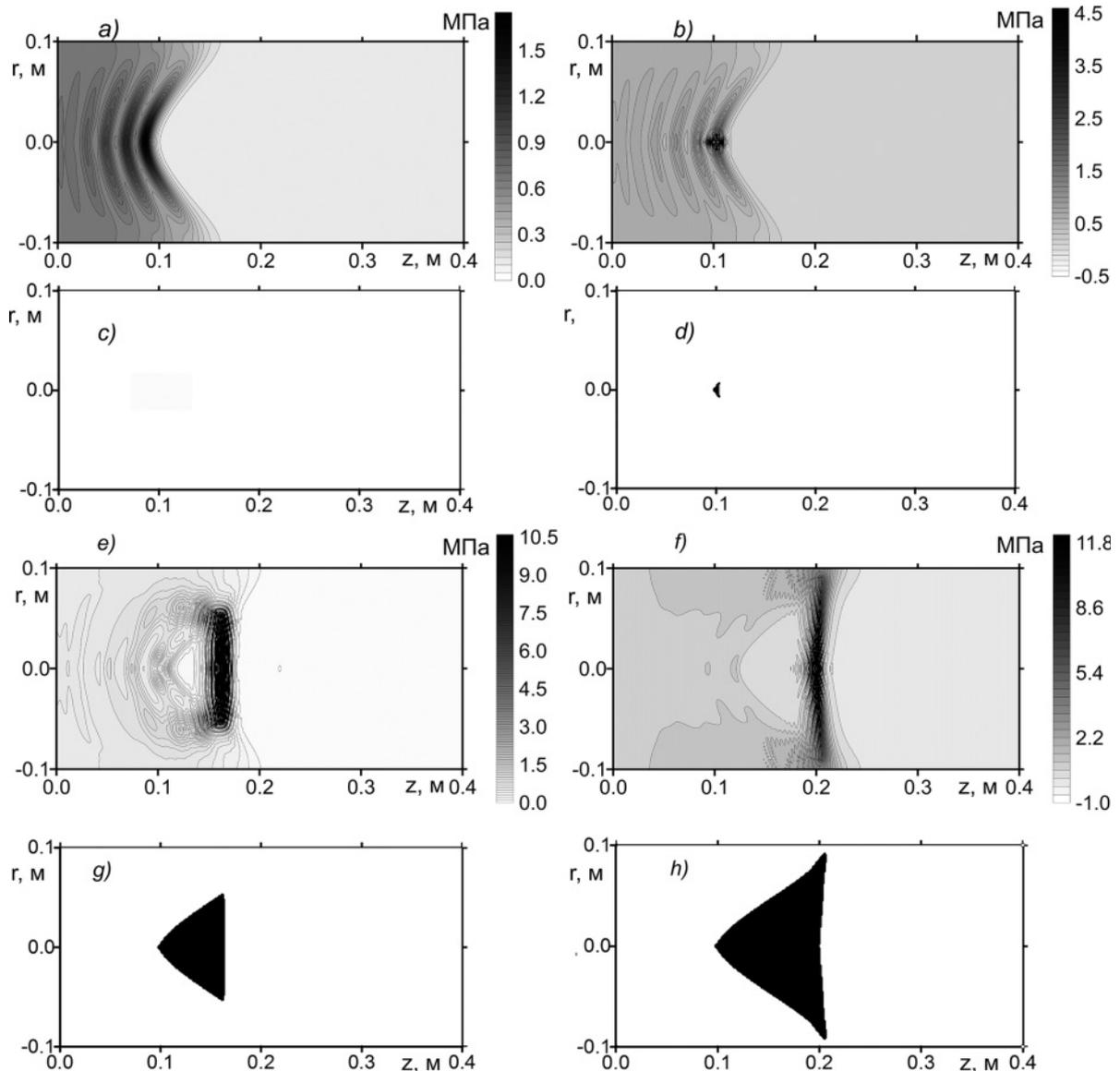


Рис. 1. Иницирование волн детонации при неоднородном распределении пузырьков по сечению трубы, когда объемное содержание пузырьков увеличивается к центру, для системы со следующими геометрическими и теплофизическими параметрами: газ – смесь ацетилена и кислорода ($C_2H_2+2,5O_2$): $\rho_{g0}=1,26 \text{ кг/м}^3$, $\gamma_0=1,35$, $\lambda_g=2,49 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/(м}\cdot\text{с}\cdot\text{град)}$, $c_g=1,14 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{град)}$, $T_0=1000 \text{ К}$, $\Delta T=3200 \text{ К}$, $\alpha_{g0}^c=0,07$, $\alpha_{g0}^w=0,001$, $a_0=1,5 \text{ мм}$; жидкость – смесь глицерина с водой, $\rho_{l0}=1126 \text{ кг/м}^3$, $\nu_l=0,75 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $C_l=1700 \text{ м/с}$; $p_0=10^5 \text{ Па}$, $\Delta p_0=0,1 \text{ МПа}$, $T_0=300 \text{ К}$, $R_c=0,1$. Шкала рядом с полем давления соответствует значению давления в МПа

Fig. 1. Initiation of detonation waves in non-uniform distribution of bubbles in the cross section of the pipe when the volume content of bubbles increases towards the center, for a system with the following geometric and thermal parameters: gas – a mixture of acetylene and oxygen ($C_2H_2+2,5O_2$): $\rho_{g0}=1,26 \text{ kg/m}^3$, $\gamma_0=1,35$, $\lambda_g=2,49 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/(м}\cdot\text{с}\cdot\text{гр)}$, $c_g=1,14 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{гр)}$, $T_0=1000 \text{ К}$, $\Delta T=3200 \text{ К}$, $\alpha_{g0}^c=0,07$, $\alpha_{g0}^w=0,001$, $a_0=1,5 \text{ мм}$; liquid – a mixture of glycerol and water, $\rho_{l0}=1126 \text{ kg/m}^3$, $\nu_l=0,75 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $C_l=1700 \text{ м/с}$; $p_0=10^5 \text{ Па}$, $\Delta p_0=0,1 \text{ МПа}$, $T_0=300 \text{ К}$, $R_c=0,1$. The scale next to the field of pressure corresponds to the pressure in MPa

волна, инициированная в осевой зоне, начинает распространяться в зону с меньшим объемным содержанием газа, причем фронт волны имеет плоскую форму. Картинки (f) и (h), соответствующие моменту времени 1,1 мс, показывают, что детонационная волна со временем распространяется практически по всему сечению канала. Отметим, что, хотя концентрация газовой фазы по сечению

канала линейно возрастает к центру, фронт детонационной волны по сечению канала практически однороден. Кроме того, со временем из-за поджатия осевой зоны наблюдается некоторое увеличение амплитуды детонационной волны.

На рис. 2 представлены эпюры давления по координате для разных значений в момент времени 1,0 мс (параметры расчета те же, что на рис. 1.) Из

рис. 2 видно, что амплитуда в центре трубы к моменту 1,0 мс приблизительно равна 12,0 МПа (линия 1), а вблизи стенок трубы (линия 2) составляет около 4,0 МПа. Для сравнения на рис. 3 представлены эпюры давлений для тех же параметров расчета, как для рис. 1, но для однородного распределения газовой фазы по сечению канала, причем линия 1 (верхняя картинка) соответствует объемному содержанию пузырьков 0,07, а линия 2 (нижняя картинка) – объемному содержанию 0,001. Видно (рис. 3), что в случае однородного распределения пузырьков по сечению трубы амплитуды волны давления типа «ступенька» величиной ~0,7 МПа недостаточно для того, чтобы возбудить детонацию. В этом случае профиль волны соответствует профилю нелинейной волны, распространяющейся в пузырьковой среде с неактивными пузырьками (например, заполненных воздухом), при этом характерные осцилляции связаны с радиальной инерцией пузырьковой жидкости. При неравномерном распределении газа по сечению трубы, даже если амплитуда первоначальной волны в начале распространения не может возбудить детонацию, при дальнейшей эволюции сигнала вглубь происходит его фокусировка в область, где объемное содержание больше, и возникают условия для иницирования детонации.

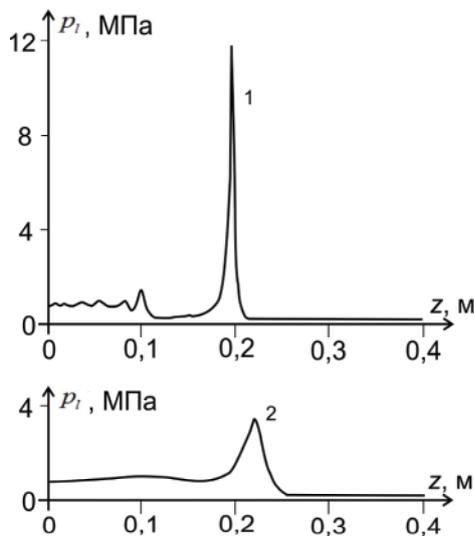


Рис. 2. Эпюры давления в момент времени 0,1 мс при неоднородном распределении пузырьков по сечению трубы, когда объемное содержание пузырьков увеличивается к центру от $\alpha_{g0}^v=0,001$ до $\alpha_{g0}^v=0,07$ (линия 1 соответствует оси трубы, линия 2 – стенкам трубы). Все геометрические и теплофизические параметры такие же, как на рис. 1

Fig. 2. Plots of pressure at a time of 0,1 ms at nonuniform distribution of bubbles over the tube section, when the volume content of bubbles increases from the center to the periphery from $\alpha_{g0}^v=0,001$ to $\alpha_{g0}^v=0,07$ (Line 1 corresponds to the tube axis, the line 2 – to the tube walls). All geometric and thermal parameters are the same as in Fig. 1

На рис. 4, 5 представлено распределение давления в пузырьковой жидкости, когда объемное со-

держание пузырьков увеличивается линейно от центра к стенке трубы по линейному закону, как для рис. 1, где $\alpha_{g0}^c=0,001$, $\alpha_{g0}^w=0,07$. Остальные начальные и граничные условия такие же, как на рис. 1.

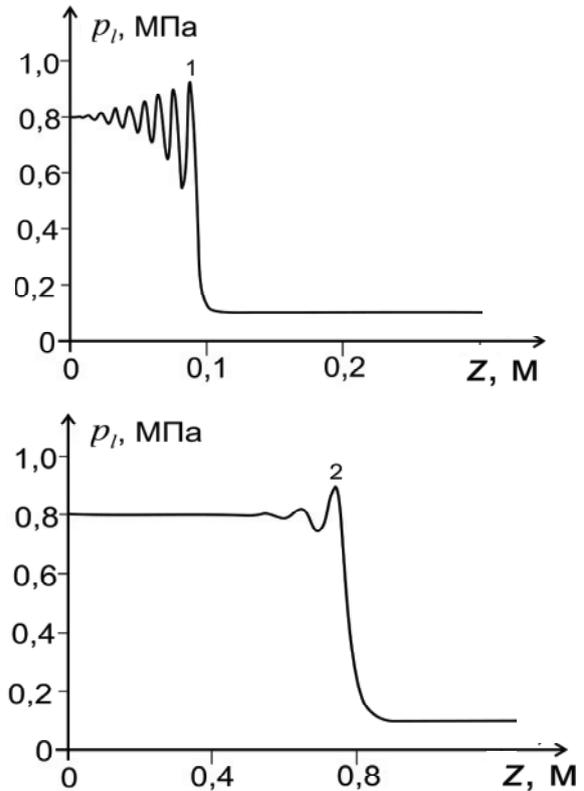


Рис. 3. Эпюры давления в момент времени 0,1 мс при однородном распределении пузырьков по сечению трубы (линия 1 соответствует $\alpha_{g0}^v=0,07$, линия 2 – $\alpha_{g0}^v=0,001$). Все остальные геометрические и теплофизические параметры такие же, как на рис. 1

Fig. 3. Plots of pressure at a time of 0,1 ms for homogeneous distribution of bubbles across the tube (Line 1 corresponds to the $\alpha_{g0}^v=0,07$, line 2 – $\alpha_{g0}^v=0,001$). All other geometric and thermal parameters are the same as in Fig. 1

На рис. 4 поля давления (а), (b), (е) и (f) и индикатора детонации (с), (d), (g) и (h) соответствуют моментам времени $t=0,8; 0,9; 1,1$ и $1,2$ мс. Профили волн давления в момент 1,2 мс для различных значений радиальной координаты r представлены на рис. 5. Из картинок (а) и (с) видно, что первоначальная волна давления при распространении фокусируется на участках около стенки трубы, где объемное содержание газа наибольшее.

При этом амплитуда реализующегося давления ~1,0 МПа недостаточна для иницирования детонации в системе и поэтому детонационный процесс не возбуждается. Из картинок (b) и (d) видно, что к моменту $t=0,9$ мс на участке трубы около стенки инициируется детонационная волна, амплитуда которой около 4,8 МПа. Из картинок (е) и (g) следует, что инициированная детонационная волна распространяется не только в положительном направлении оси z , но и к центру трубы, амплитуда

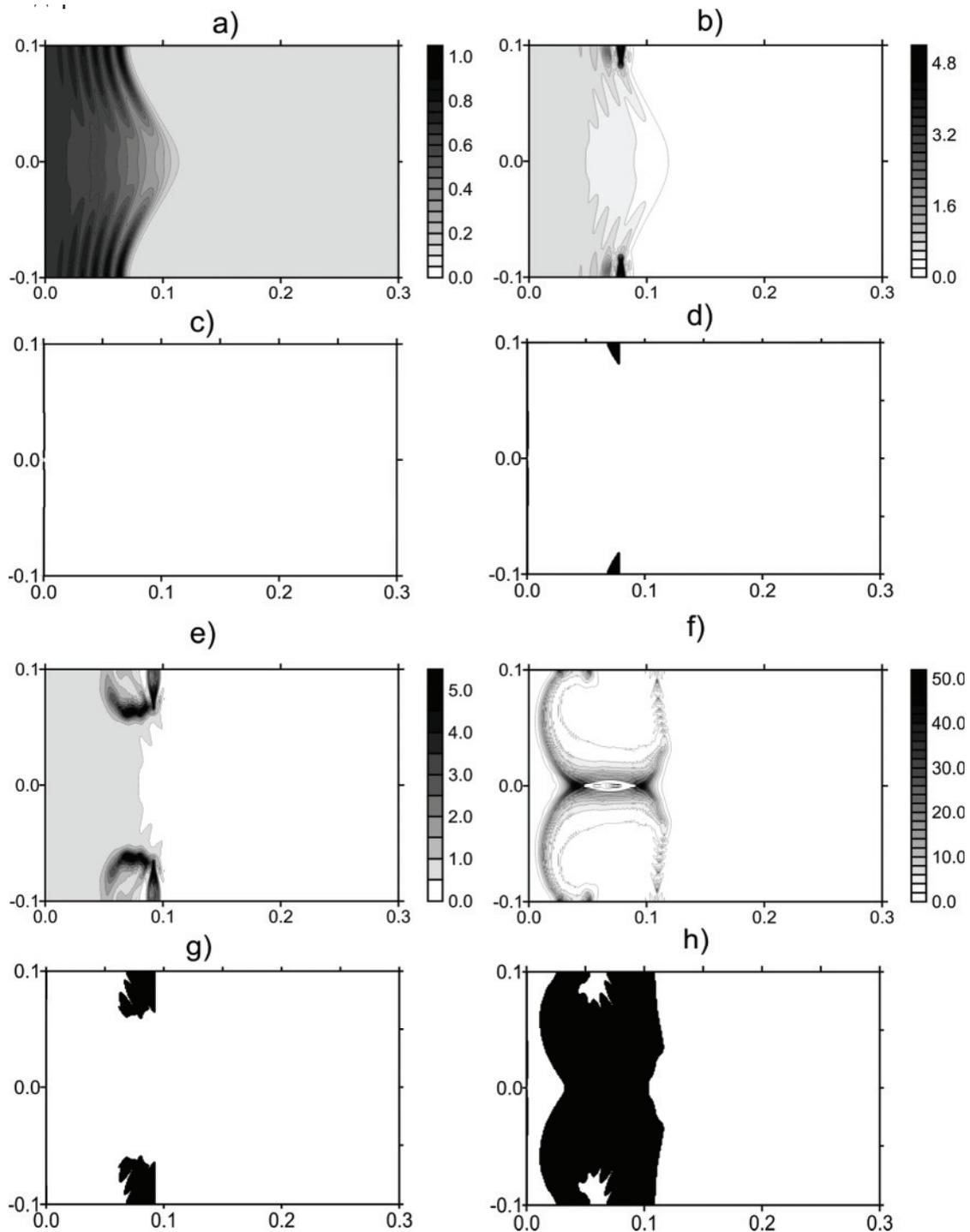


Рис. 4. Динамика волн при неоднородном распределении пузырьков по сечению трубы, когда объемное содержание пузырьков увеличивается от центра к стенкам трубы от $\alpha_{50}^c=0,001$ до $\alpha_{50}^w=0,07$. Остальные параметры такие же, как для рис. 1

Fig. 4. Dynamics of waves in inhomogeneous distribution of bubbles over the tube section, when the volume content of bubbles increases from the center to the walls of the tube from $\alpha_{50}^c=0,001$ to $\alpha_{50}^w=0,07$. All other geometric and thermal parameters are the same as in Fig. 1

детонационных волн при этом составляет около 6,0 МПа.

Картинки (f) и (h) на рис. 4, а также эпюры давления рис. 5 показывают динамику детонационной волны в момент 1,2 мс. Видно, что в этот мо-

мент времени детонационная волна распространяется не только в положительном направлении оси z , но и в обратном. Отметим, что детонационная волна, распространяющаяся к центру из периферии трубы, из-за геометрии увеличивает свою ам-

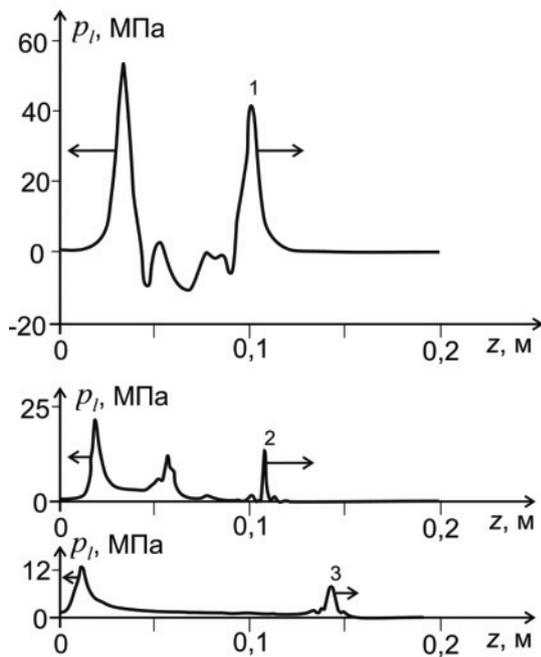


Рис. 5. Профили волны давления при неоднородном распределении пузырьков по сечению трубы, когда объемное содержание пузырьков увеличивается от центра к стенкам трубы от $\alpha_{g0}^* = 0,001$ до $\alpha_{g0}^* = 0,07$ в момент времени 1,2 мс. Линии 1, 2 и 3 соответствуют $r=0$, $r=R_w$ и $r=R_w/2$ соответственно

Fig. 5. Profiles of a pressure wave at non-uniform distribution of bubbles over the tube section, when the volume content of bubbles increases from the center towards the walls of the tube from $\alpha_{g0}^* = 0,001$ to $\alpha_{g0}^* = 0,07$ at time 1,2 ms. Lines 1, 2 and 3 correspond to $r=0$, $r=R_w$ and $r=R_w/2$ respectively

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Superabsorption of acoustic waves with bubble metascreens / V. Leroy, A. Strybulevych, M. Lanoy, F. Lemoult, A. Tourin, J.H. Page // *Phys. Rev. B.* – 2015. – V. 91. – P. 020301.
2. Ishii R., Matsuhisa H. Steady reflection, absorption and transmission of small disturbances by a screen of dusty gas // *J. Fluid Mech.* – 1983. – V. 130. – P. 259–277.
3. Lee K., Choi B.K., Yoon S.W. Acoustic pressure reflection coefficients of a subsurface bubble layer in water // *Journal of the Korean Physical Society.* – 2002. – V. 40. – № 2. – P. 256–263.
4. Tien T.M. Sound propagation through a bubble screen at finite gas-volume fraction. Master Thesis. – Tainan, Taiwan, 2001. – 71 p.
5. Sound velocity and attenuation in bubbly gels measured by transmission experiments / V. Leroy, A. Strybulevych, J.H. Page, M.G. Scanlon // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2008. – V. 123. – № 4. – P. 1931–1940.
6. Temkin S. Suspension acoustics: an introduction to the physics of suspensions. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 398 p.
7. Prosperetti A. Vapor bubbles // *Ann. Rev. Fluid Mech.* – 2017. – V. 49. – P. 221–248.
8. Hasegawa T., Fujiwara T. Detonation in Oxyhydrogen Bubbled Liquids // *Proc. 19th Intern. Symp. on Combustion.* – Hafnia, 1982. – P. 675–683.
9. Баязитова А.Р., Гималтдинов И.К., Шагапов В.Ш. Волны давления в трубе, заполненной пузырьковой смесью с неоднород-

плитуду. Видно, что на оси трубы происходит столкновение детонационных волн и при этом их амплитуда увеличивается до 50 МПа и выше. Как видно из картинки (h), в зоне, где произошла детонация, остаются участки с непрогоревшим газом, что связано с тем, что детонация не инициируется на участках, которые предварительно поджаты волной давления [19–21]. Из анализа рис. 1–5 следует, что неоднородное по сечению трубы распределение взрывчатых пузырьков приводит к значительному уменьшению амплитуды первоначальной волны, способной инициировать детонацию. Для приведенных расчетов значение амплитуды давления составляет 0,7 МПа, что почти в 3 раза меньше амплитуды волны, способной инициировать детонацию, в случае однородного распределения взрывчатых пузырьков по сечению трубы при тех же параметрах системы.

Заключение

Исследована динамика детонационных волн в трубе с неоднородным распределением взрывчатых пузырьков по сечению.

Рассмотрены два случая: первый, когда объемное содержание пузырьков с взрывчатым газом увеличивается к центру трубы, второй – когда объемное содержание увеличивается к стенкам трубы. Для обоих случаев установлено, что волна с умеренной начальной амплитудой (0,7 МПа) может инициировать пузырьковую детонацию из-за фокусировки волны в область, где объемное содержание пузырьков наибольшее.

Работа поддержана грантами РФФИ, номера проектов 16–01–00432, 17–41–020244.

- нм распределением по сечению // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа.* – 2006. – № 3. – С. 67–78.
10. Распространение детонационных волн вдоль трубчатого пузырькового кластера, находящегося в жидкости / В.Ш. Шагапов, И.К. Гималтдинов, А.Р. Баязитова, Д.С. Спевак // *Теплофизика высоких температур* – 2009. – Т. 47. – № 3. – С. 424–431.
11. Динамика детонационных волн в кольцевом слое круглой трубы / А.Р. Баязитова, И.К. Гималтдинов, А.М. Кучер, В.Ш. Шагапов // *Известия РАН. Механика жидкости и газа.* – 2013. – Т. 48. – № 2. – С. 201–210.
12. Ждан С.А. Детонация столба химической активной среды в жидкости // *Физика горения и взрыва.* – 2003. – Т. 39. – № 4. – С. 107–112.
13. Ждан С.А., Ляпидевский В.Ю. Детонация в двухслойной пузырьковой среде // *Физика горения и взрыва.* – 2002. – Т. 38. – № 1. – С. 123–128.
14. Топольников А.С., Гималтдинов И.К. Динамика детонационных волн в каналах переменного сечения, заполненных пузырьковой жидкостью // *Теплофизика и аэромеханика.* – 2014. – Т. 21. – № 4. – С. 489–498.
15. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. – М: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 464 с.
16. Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Вахитова Н.К. Проявление сжимаемости несущей фазы при распространении волн в пузырьковой среде // *ДАН СССР.* – 1989. – Т. 304. – № 5. – С. 1077–1081.

17. Николаев Ю.А., Топчиан М.Е. Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах // Физика горения и взрыва. – 1977. – Т. 13. – № 3. – С. 393–404.
18. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные методы решения задач газовой динамики. – М.: Наука, 1980. – 352 с.
19. Сычев А.И. Влияние начального давления пузырьковых сред на характеристики волн детонации // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – № 4. – С. 126–129.
20. Сычев А.И. Влияние начального давления многокомпонентных пузырьковых сред на характеристики волн детонации // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. – № 5. – С. 15–19.
21. Сычев А.И. Влияние начального давления полидисперсных пузырьковых сред на характеристики волн детонации // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87. – № 4. – С. 504–507.

Поступила 17.01.2018 г.

Информация об авторах

Гималтдинов И.К., доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Баязитова А.Р., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной информатики и программирования Факультета математики и информационных технологии Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета.

UDC 532.329; 532.2.532

INITIATION AND PROPAGATION OF DETONATION WAVES IN A TUBE WITH BUBBLES INHOMOGENEOUS DISTRIBUTION OVER CROSS-SECTION

Ilias K. Gimaltdinov¹,

iljas_g@mail.ru

Alina R. Bayazitova²,

Estlina@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

² Sterlitamak branch of Bashkir State University,
49, Lenin avenue, Sterlitamak, 453103, Russia.

Relevance. Propagation of a detonation wave in a bubble liquid is a unique phenomenon, as the bubble detonation is initiated and propagated in the systems with very low energy content, but at the same time it has common features for all detonation waves (self-sustaining stationary process). Since bubble media are structurally different from chemically active homogeneous media (liquid, gaseous, solid explosives) and heterogeneous (gas-particles, foam, etc.), detonation in bubbling media has a number of features related to the specific bubble medium. Bubble liquids are a working medium in various industries related to oil refining, metallurgy, etc. In some cases, the bubble liquids are a working medium for technological processes (for example, liquid-phase oxidation of various gases), in others – an element of the explosion-proof system (safety fluid closures), therefore, it is necessary to develop scientific principles for selecting explosion-proof modes of technological processes in gas-liquid media and operation of liquid safety gates.

The aim of the research is to study the features of initiation and propagation of detonation in a bubble liquid with inhomogeneous distribution of explosive bubbles along the section of the tube.

The object of research is bubble liquids containing an explosive gas inside the bubbles.

The research method is based on solving a system of partial differential equations.

The results of the research showed that the non-uniform distribution of explosive bubbles along the tube cross section leads to a significant decrease in the amplitude of the initial wave, which can initiate detonation. In addition, it was found that when a detonation wave is propagated because of the preload, the sites remain unconfined.

Key words:

Two-dimensionality, detonation, wave, bubbles, liquid, gas.

The research was funded by the RFBR grants, project numbers 16–01–00432, 17–41–020244.

REFERENCES

1. Leroy V., Strybulevych A., Lanoy M., Lemoult F., Tourin A., Page J.H. Superabsorption of acoustic waves with bubble metascreens. *Phys. Rev. B*, 2015, vol. 91, pp. 020301.
2. Ishii R., Matsuhisa H. Steady reflection, absorption and transmission of small disturbances by a screen of dusty gas. *J. Fluid Mech.*, 1983, vol. 130, pp. 259–277.
3. Lee K., Choi B.K., Yoon S.W. Acoustic pressure reflection coefficients of a subsurface bubble layer in water. *Journal of the Korean Physical Society*, 2002, vol. 40, no. 2, pp. 256–263.
4. Tien T.M. *Sound propagation through a bubble screen at finite gas-volume fraction*. Master Thesis. Tainan, Taiwan, 2001. 71 p.
5. Leroy V., Strybulevych A., Page J.H., Scanlon M.G. Sound velocity and attenuation in bubbly gels measured by transmission experiments. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008, vol. 123, no. 4, pp. 1931–1940.
6. Temkin S. *Suspension acoustics: an introduction to the physics of suspensions*. Cambridge, Cambridge University Press, 2005. 398 p.
7. Prosperetti A. Vapor bubbles. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 2017, vol. 49, pp. 221–248.
8. Hasegawa T., Fujiwara T. Detonation in Oxyhydrogen Bubbled Liquids. *Proc. 19th Intern. Symp. on Combustion*. Hafsa, 1982. pp. 675–683.
9. Bayazitova A.R., Gimaltdinov I.K., Shagapov V.Sh. Pressure waves in a tube filled with a bubbly mixture with a nonuniform cross-sectional bubble distribution. *Fluid Dynamics*, 2006, no. 3, pp. 381–390.
10. Shagapov V.S., Gimaltdinov I.K., Bayazitova A.R., Spevak D.S. Propagation of detonation waves along a tubular bubble cluster in liquid. *High Temperature*, 2009, vol. 47, no. 3, pp. 424–431.
11. Bayazitova R., Gimaltdinov I.K., Kucher A.M., Shagapov V.Sh. Dynamics of Detonation Waves in an Annular Layer of a Round Pipe. *Fluid Dynamics*, 2013, vol. 48, no. 2, pp. 201–210.
12. Zhdan S.A. A detonation of a column of chemically active bubble medium. *Physics of Combustion and Explosion*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 458–463.
13. Zhdan S.A., Liapidevskii V.Yu. Detonation in a two-layer bubbly medium. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2002, vol. 38, no. 1, pp. 109–113.
14. Topolnikov A.S., Gimaltdinov I.K. Dynamics of detonation waves in a channel with variable cross section and filled with bubbly fluid. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 4, pp. 489–498.
15. Nigmatulin R.I. *Dynamics of Multiphase Media*: vol. 1, 2. New York, United States, Hemisphere Publ. Corp., 1990. 507 p.
16. Nigmatulin R.I., Shagapov V.Sh., Vakhitova N.K. Compressibility of carrier liquid in distribution of waves in bubbling environment. *Soviet Physics. Doklady*, 1989, vol. 34, no. 2, pp. 495–500.
17. Nikolaev I.A., Topchiian M.E. Calculation of equilibrium flows in detonation waves in gases. *Fizika Goreniia i Vzryva*, 1977, vol. 13, pp. 327–338.

18. Samarskiy A.A., Popov Yu.P. *Raznostnye metody resheniya zadach gazovoy dinamiki* [Differential methods of solving the problems of gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 352 p.
19. Sychev A.I. Influence of the initial pressure in bubble media on the detonation wave parameters. *Technical physics. The Russian journal of applied physics*, 2015, vol. 60, no. 4, pp. 603–606.
20. Sychev A.I. Effect of the initial pressure of multicomponent bubble media on the characteristics of detonation waves. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2016, vol. 61, no. 5, pp. 654–658.
21. Sychev A.I. Influence of the initial pressure of polydisperse bubble media on characteristics of detonation waves. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 62, no. 4, pp. 523–626.

Received: 17 January 2018.

Information about the authors

Ilias K. Gimaltdinov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Alina R. Bayazitova, Cand. Sc., associate professor, Sterlitamak branch of Bashkir State University.

УДК 332.362

ЛАНДШАФТНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ЗОНИРОВАНИЮ СТРУКТУРЫ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ НА МАЛОМ ВОДОСБОРЕ

Ерофеев Александр Анатольевич^{1,2},
erofeew@yandex.ru

Копысов Сергей Геннадьевич^{1,3},
wosypok@mail.ru

Никифоров Артём Николаевич³,
a.nik-n@mail.ru

¹ Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

² Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

³ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3.

Актуальность работы обусловлена необходимостью оптимизации существующего землепользования на малых водосборах для обеспечения устойчивого эколого-социального развития.

Цель работы: создание на уровне малого водосбора метода устойчивой и оптимальной организации ландшафта с учетом распределенных микроклиматических и ландшафтно-гидрологических условий для наиболее эффективного использования земельных ресурсов в соответствии с динамикой природных процессов на водосборе.

Методы: синтез методов геофизических исследований, в частности метода гидролого-климатических расчетов в сочетании с методами количественного описания рельефа земной поверхности на основе цифровых моделей рельефа (геоморфометрии). Выполнен расчет ряда гидроциркуляционных и инсоляционных морфометрических показателей рельефа, оказывающих влияние на разнообразие ландшафтных условий формирования водного стока. Учет различий в условиях произрастания на разных формах рельефа осуществляется на основе интеграции метода гидролого-климатических расчетов со ступенями увлажнения по геоботанической шкале Л.Г. Раменского, характеризующими условия местообитания по составу растительности. Для уточнения модельных расчетов в характерных участках исследуемого водосбора организован автоматизированный мониторинг стока воды и некоторых других воднобалансовых элементов.

Результаты. На основе выявленного разнообразия ландшафтных ресурсов смоделировано оптимальное распределение видов землепользования по исследуемому водосбору, определена экологическая ёмкость водосбора по потенциальному водопотреблению. Применение предлагаемого метода позволяет обеспечить энергоэффективное использование ландшафтных ресурсов, а значит и устойчивое развитие природно-социальных систем. В первую очередь метод следует рекомендовать для вновь вводимых в сельскохозяйственный оборот земель и буферных зон природоохранных территорий.

Ключевые слова:

Землепользование, геофизика ландшафта, водный баланс, метод гидролого-климатических расчетов, геоморфометрия, Западная Сибирь.

Введение

Подход к анализу разнородных параметров окружающей среды, полученных дистанционными способами, при создании композитной карты организации оптимального землепользования территории, в последнее время получает всё более широкое распространение, как, например, в работах [1, 2]. При этом комплексно подойти к решению задачи организации устойчивого землепользования может позволить интегральный ландшафтно-геофизический подход, применяемый на малых водосборах, рассматриваемых в качестве хозяйственной единицы. Такая постановка проблемы была обозначена еще в конце XIX в. В.В. Докучаевым [3], занимавшимся природообустройством и предпринимавшим меры по оптимизации природных систем с учётом экологической роли различных элементов ландшафта. В Водном кодексе РФ

[4] также предусматривается разработка схем комплексного использования и охраны водных объектов, в частности, в целях определения допустимой антропогенной нагрузки на водные объекты и обеспечения их охраны. Теоретической основой для достижения указанных целей могут являться воднобалансовые исследования для отдельных речных бассейнов. При этом в данное время появляется возможность взглянуть на решение подобных задач с использованием новейших высокопроизводительных методов геомоделирования.

К началу XXI в. было доказано, что отдельные типы ландшафтов играют гораздо большую роль в глобальном притоке явного или скрытого тепла от суши в атмосферу, чем можно было ожидать [5]. Исходя из этого, предлагаемый в данной статье метод решения задачи организации оптимальной структуры землепользования основан на расчёте

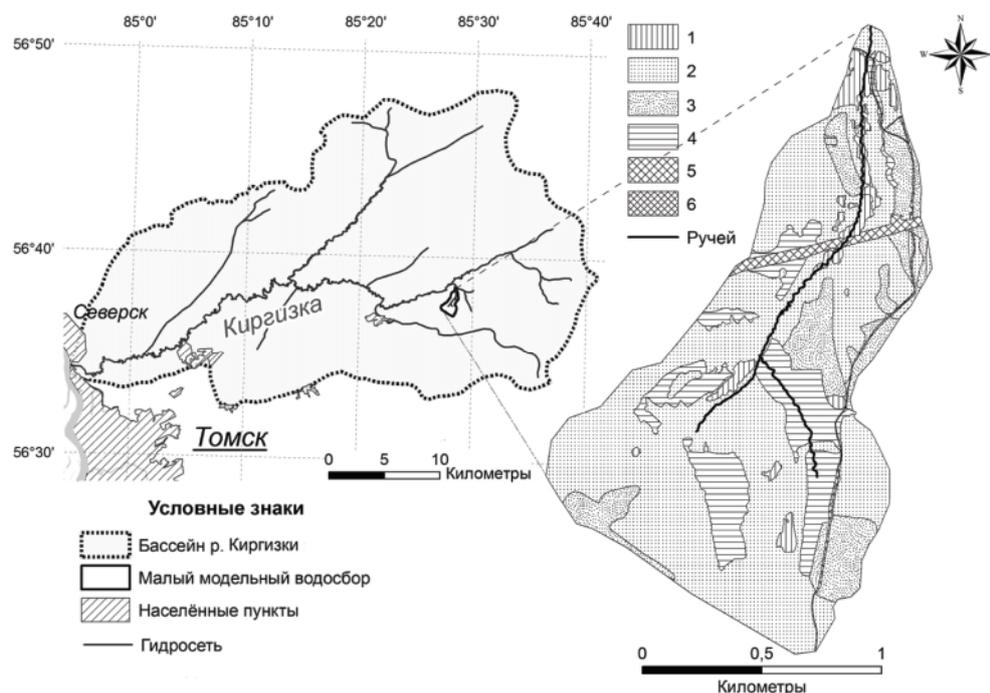


Рис. 1. Географическое расположение модельного водосбора и существующая структура видов землепользования: 1) елово-пихтовый высокотравный лес (4,5 %); 2) берёзово-осиновые высокотравные леса (62 %); 3) брошенные сельскохозяйственные угодья с густым берёзовым молодняком (14,5 %); 4) сенокосы с высокотравными лугами (15,5 %); 5) грунто-вые зарастающие дороги (1,8 %); 6) просеки ЛЭП с разнотравными лугами (1,7 %)

Fig. 1. Spatial location of the studied watershed and the existing structure of land use types: 1) fir high grass forests (4,5 %); 2) birch and aspen high grass forests; 3) abandoned agricultural lands with dense young birch forests (14,5 %); 4) hay-making with high grass meadows (15,5 %); 5) soil regenerating roads (1,8 %); 6) rights-of-way of power transmission line with grass meadows (1,7 %)

элементов водного баланса с отдельных ландшафтов в пределах речных бассейнов по методу гидролого-климатических расчетов (ГКР) с учётом ландшафтных условий формирования стока, определяемых по гидроциркуляционным и инсоляционным геофизическим показателям, рассчитываемым в ГИС на основе цифровых моделей рельефа.

Модельный водосбор

Объект исследования – модельный водосбор площадью 2,04 км² – располагается в 30 км от города Томска, в бассейне реки Киргизка (844 км²) на ручье, который является притоком второго порядка (рис. 1).

На водосборе организован учёт стока воды в среднем течении и в замыкающем створе с помощью треугольного водослива с подтопленным нижним бьефом. Также в средней и нижней части водосбора установлены экспериментальные системы автоматического мониторинга элементов водного баланса (САМ ЭВБ) [6].

Выбор модельного водосбора был обусловлен следующими факторами:

- выраженным рельефом, позволяющим однозначно определить границы водосбора и обеспечивающим разнообразие ландшафтных;
- относительной близостью к городу, предоставляющей возможность регулярных натуральных

наблюдений, в сочетании со слабой антропогенной нагрузкой на водосбор.

Относительный перепад высот поверхности модельного водосбора, расположенного на пологоволнистой приподнятой дренированной равнине, составляет 58 м (абсолютная высота в устьевой части 149 м). В пределах водосбора выделяются две крупные ложбины шириной 170–250 м, в которых преимущественно и концентрируется сток. Среди основных типов рельефа на исследуемой территории выделяются: 1) пониженный (пойменный), расположенный на абсолютных высотах 150–180 м с уклонами 0,5–3° и занимающий дно ложбин; 2) склоновый, расположенный на крутых склонах (5–13°) с абсолютными высотами 165–195 м; 3) выровненный (слабонаклонный), расположенный на водораздельных пространствах с абсолютными высотами 170–207 м и незначительными уклонами 0,3–2°.

Для изучения почвенного покрова в 2015 г. нами заложен разрез в нижней части водосбора на краю разнотравного луга, граничащего с берёзовым лесом с примесью ели. Напочвенный покров представлен осочкой малой, зверобоем лекарственным, чиной Гмелина, володушкой золотистой, лютиком, манжеткой. Проективное покрытие составляет 50–60 %. По современной почвенной классификации таксономические характеристики

почв следующие: *отдел* – текстурно-дифференцированная; *тип* – дерново-подзолистая; *подтип* – контактно-осветленная; *род* – безкарбонатная; *вид* – сверхглубокоосветленная; *разновидность* – среднесуглинистая; *разряд* – с мощным профилем.

Леса на данной территории преимущественно вторичные берёзово-осиновые, в понижениях с примесью ели и пихты (рис. 1).

Методика геоинформационного моделирования

Как известно, важное геофизическое значение рельефа земной поверхности связано с перераспределением им вещества и энергии, а следовательно, и полей гравитации и инсоляции. При его геоинформационном моделировании нами был апробирован комбинированный способ создания цифровой модели рельефа (ЦМР). В качестве базовой информации о рельефе использовались данные SRTM с пространственным разрешением 30 м и Aster GDEM с пространственным разрешением 15 м [7–9]. Вся поверхность модельного водосбора состояла из 42080 пикселей (разрешение 160 на 263 пикселей). Для уточнения матрицы рельефа в неё включалась информация, полученная с крупномасштабных топокарт масштаба 1:25000 (горизонтали, высотные отметки и урезы воды), а также материалы нивелирной съёмки долинно-русловой сети. Это позволило увеличить пространственное разрешение ЦМР до 10 м, а точность определения абсолютных высот – в среднем до 1–2 м. Такой подход дал возможность анализировать рельеф водосбора в достаточной для интегральных водно-балансовых исследований степени.

Полученная матрица высот подвергалась гидрологической коррекции [10, 11]. После чего, с целью дальнейшего их преобразования в элементы водного баланса территории, рассчитывались ключевые *гидроциркуляционные* (индекс потенциальной влажности) и *инсоляционные* (экспозиция, закрытость горизонта) морфометрические величины (МВ).

Учёт гидроциркуляционных параметров при расчёте элементов водного баланса

Наиболее согласованной с точностью задания внешних условий является интегральная форма записи уравнений теплового и водного баланса. Поэтому нами для расчётов гидролого-климатического режима используется система уравнений метода ГКР [12–15], представляющая собой математическую модель процессов преобразования влаги на уровне деятельной поверхности водосборов, основанную на законах сохранения энергии и материи [13].

В методе ГКР ландшафтные условия формирования стока учитываются параметром n , отражающим в первую очередь геоморфологические условия формирования стока и способность деятельного слоя ландшафта сбрасывать избыточную влагу под действием сил гравитации [9, 10].

По своему физическому смыслу наиболее близким к параметру ландшафтных условий n в методе ГКР является составная гидроциркуляционная МВ «индекс потенциальной влажности» (Wetness Index – W_T) [16–19], выделяемая автоматически на основе ЦМР при помощи специализированного программного обеспечения (SAGA, GRASS, ILWIS и др.). Его ландшафтная интерпретация в бассейнах малых рек Нижнетомской природной провинции дана в работе А.А. Ерофеева [20]. Позднее эти две величины были нами связаны следующей зависимостью [21]:

$$n = 1,1 + \frac{W_T}{6,1}. \quad (1)$$

Показатель максимально возможного испарения в методе ГКР не связан с конкретным видом испаряющей поверхности и представляет собой усреднённые для больших территорий величины [12]. Эта проблема была нами частично решена путём учёта инсоляционных характеристик ландшафта, рассчитываемых в ГИС-пакете SAGA [11]. Было сделано допущение: для территорий с выраженным рельефом пространственное распределение теплоэнергетических ресурсов испарения должно определяться отношением фактической продолжительности освещённости конкретного участка, j_i , к продолжительности освещённости при нулевом уклоне и открытом горизонте, j_0 . На основании этого к сумме температур выше 10 градусов ($\sum t_{>10^\circ\text{C}}$) вводится следующая поправка, учитывающая уклоны, экспозиции и закрытость горизонта:

$$\chi = 1 + \log\left(\frac{j_i}{j_0}\right). \quad (2)$$

Введение данной поправки даёт результаты аналогичные табличным данным [14] о термических характеристиках различных форм рельефа. Формула для расчёта водного эквивалента теплоэнергетических ресурсов испарения (испаряемости) [12] с учётом данной поправки приобретает следующий вид:

$$Z_M = 200\left(\frac{\chi \sum t_{>10^\circ\text{C}}}{1000}\right) + 306 = \frac{\chi \sum t_{>10^\circ\text{C}}}{5} + 306. \quad (3)$$

Результаты расчёта гидроциркуляционных параметров представлены на рис. 2. Для выравненных элементов рельефа принята испаряемость 678 мм, вычисленная по ГМС Томск за период с 1881 по 2013 гг. по данным [22].

Расчитанное пространственное распределение испарения (рис. 2-Г) показывает картину, схожую с распределением параметра ландшафтных условий формирования стока (рис. 2-А), что для территорий с оптимальным увлажнением (осадки \approx испаряемость) объясняется недостатком влаги на наиболее дренированных элементах рельефа (испарение 461 мм). Средняя многолетняя величина испарения на водосборе составляет 496 мм, а на наиболее увлажнённых участках – до 522 мм.

Величина местного стока (рис. 2-Б) имеет наименьшие значения там, где из-за плохих условий сброса избыточной влаги (максимальные значения параметра n) испаряется (рис. 2-В) наибольшее количество воды. Реальный русловой сток интегрирует местный сток в виде русловой сети. Изменчивость величины осадков от рельефа и растительности нами не учитывалась ввиду отсутствия однозначных схем учёта и недостаточной точности измерения осадков. В дальнейшем этот вопрос будет решаться с привлечением данных снегомерных съёмок.

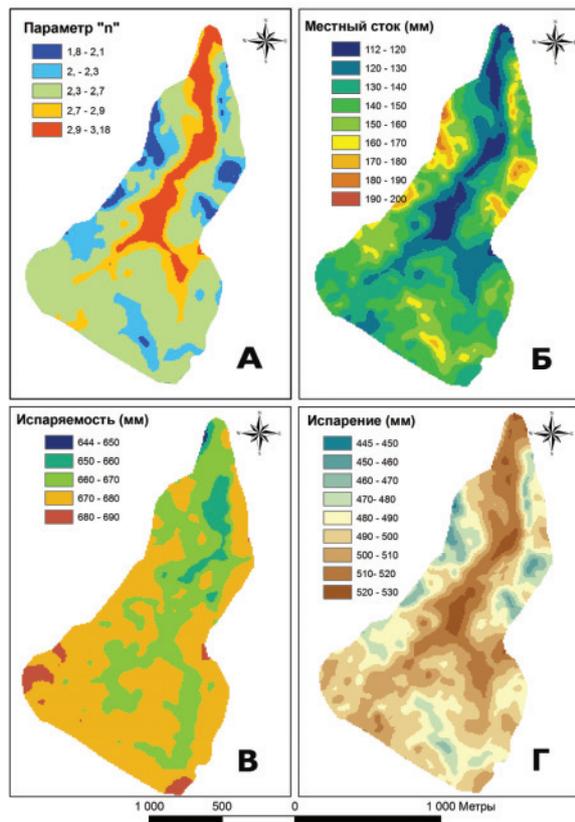


Рис. 2. Распределение параметра ландшафтных условий формирования стока n и основных среднесезонных величин водного баланса на модельном водосборе

Fig. 2. Distribution of the parameter of runoff generation landscape conditions n and normal annual amounts of water balance at the studied watershed

Гидролого-климатическая оптимизация структуры землепользования

В соответствии с агроклиматическим районированием на исследуемом водосборе следует развивать животноводческое и нетоварное полевое хозяйство. Рекомендуется выращивать среднеспелые и раннеспелые сорта яровой пшеницы, озимой ржи, ранне- и позднеспелые сорта ячменя, овса, гречихи, картофеля, гороха, льна [23].

Во времена подъёма целины все пригодные земли на водосборе были освоены под пашню, в том числе и расположенные на покатых и пологих

склонах подверженных эрозии. Это было обусловлено борьбой с мелкоконтурностью, которая привела к разрушению установившихся биогеоценозов и к снижению плодородия почв.

После 1992 г. пашню на водосборе перестали обрабатывать, что привело к её резкому зарастанию густым ковром березовой поросли (рис. 1). Значительно медленнее и неравномерно зарастали земли, использовавшие под сенокосы. За прошедшие 25 лет почвы на исследуемом водосборе уже хорошо отдохнули, и теперь на основании экологических принципов их вновь можно запускать в правильное землепользование, которое, по мнению Ю. Одума [24], является самым важным практическим приложением науки об окружающей среде. Введение брошенных земель в оборот потребует немало финансовых затрат на раскорчевку, а этого можно было бы избежать, если бы вышедшую из оборота пашню в течение первых лет обкашивали.

При распределении землепользования по площади водосбора, по нашему мнению, следует отталкиваться от фундаментальных основ устойчивости. Считается, что бинарные системы (всё-ничего, порядок-хаос) устойчивы только внутри диапазона от $1/3$ до $2/3$. Иначе резко возрастает их неустойчивость, теряется управление и без принудительного вмешательства система обречена на распад. Именно поэтому Ю. Одум [24] писал, что человек не должен стремиться получать более одной трети валовой продукции, если он не готов поставлять энергию для обеспечения долговременного поддержания первичной продукции в биосфере.

Поэтому распределение землепользования по водосбору должно учитывать обеспеченность параметра ландшафтных условий n так, чтобы в естественном состоянии оставалось не менее $1/3$, а интенсивно использовалось (пашня, дороги, застройка) не более $1/3$ площади водосбора. Остальная территория водосбора должна использоваться умеренно (сенокосы, пастбища, сады и лесопосадки).

Для выполнения этих условия на исследуемом водосборе под сельскохозяйственные нужды, с учётом севооборотов и разделительных лесополос, следует использовать земли с значениями параметра n от 2,25 до 2,75. В соответствии с полученным распределением параметра ландшафтных условий по водосбору именно такому диапазону изменения параметра n соответствует $2/3$ площади водосбора. На этой площади водосбора должен быть организован севооборот таким образом, чтобы одновременно на пашню приходилось не более $2/9$ общей площади водосбора. Это обусловлено тем, что для разрушающего ведения земледельческого хозяйства наиболее оптимальным соотношением пашни к сенокосным угодьям является один к трем, что позволяет сохранять естественное плодородие земель за счет естественных геохимических циклов и внесения навоза.

Предлагаемый вариант структуры землепользования основывается на необходимости возвра-

щения к мелкоконтурному земледелию, т. е. расчленению больших полей на однородные участки в соответствии с их экологическими и технологическими особенностями. Обычно это предполагает проведение границ участков (лесополос) по контуру горизонталей местности [25]. Как показывает исследование, более комплексно экологические условия отражает параметр ландшафтных условий стока n , так как он интегрально отражает уклон и длину склона. При этом под пашню допустимо использовать земли на возвышенностях со значениями параметра n от 2,2 до 2,8. При больших (опасность заболачивания) и меньших (опасность эрозии) значениях параметра n допускается использование земель только в качестве сенокосов и пастбищ, а при значениях n более 2,9 (водоохранная зона поверхностного стока) и менее 2,2 (водоохранная зона подземного стока) необходимо проводить залесение.

Предлагаемая организация землепользования должна способствовать поглощению поверхностного стока, снижению интенсивности смыва почв, регулированию ветрового режима и снегонакоплению, снижению интенсивности снеготаяния (уменьшение эрозии и снижение максимальных уровней на реках) и, как принято считать [25], повышает урожайность сельскохозяйственных культур и общую биологическую продуктивность ландшафта на 10–15 %.

В конце XIX в. [26] на исследуемом водосборе действовала следующая система севооборотов: с целины (не бывшей в обработке земли) снимались 4–5 хлебов подряд, затем земля служила сенокосом 2 года (в засушливые годы на высоких местах травы очень мало), после чего обращалась в залежь на 10–15 лет. При такой системе земледелия озимые посевы на мощных слоях серой земли давали урожай САМ 10–16, а на возвышенных местах в засушливые годы не более чем САМ 3.

Такая зависимость от текущего увлажнения говорит о необходимости регулирования водного и теплового режима почв для чего разумно в овражно-балочной сети восстановить и создать новые пруды, а также вести снегозадержание на высоких элементах рельефа за счёт лесополос.

Существенные различия урожайности на разных формах рельефа объясняются количественной характеристикой растительного компонента экосистем – ступенями увлажнения (СУ) по шкале Л.Г. Раменского [27], характеризующими условия местообитания по составу растительности. Примерами других подходов служит моделирование динамики индекса листового покрытия (Leaf Area Index – LAI), как, например, в работах [28, 29]. Однако LAI подходит больше для глобального моделирования древесной растительности, так как не отражает местные условия произрастания напочвенного покрова.

Для моделирования динамики природных процессов на водосборах, индикатором которых является напочвенный растительный покров, осуществ-

ляется расчёт ступеней увлажнения по цифровым моделям рельефа и климатической увлажнённости ($\beta_H = H/Z_M$) по формуле, предложенной С.Г. Копысовым [30]:

$$СУ = 100\beta_H \left(\frac{r-1}{rn+1} \right)^{1/m}, \quad (4)$$

где водно-физические свойства почвы учитываются параметром r [12, 13].

На исследуемом водосборе выявлены ступени увлажнения от 62 до 73. Наложение карт ступеней увлажнения и зоны хозяйственной деятельности (при значениях параметра n от 2,25 до 2,75) позволило построить карту рекомендуемой структуры землепользования (рис. 3).

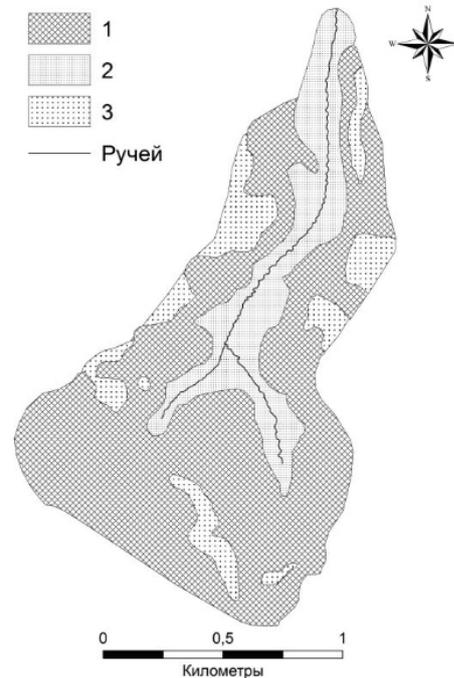


Рис. 3. Рекомендуемая структура землепользования с учётом параметра n и ступеней увлажнения

Fig. 3. Recommended structure of land use in accordance with n parameter and moisture ranges

При осуществлении предлагаемого зонирования земли, используемые для ведения сельскохозяйственной деятельности в соответствии с пунктом 3 статьи 42 Федерального закона «Об охране окружающей среды» [31], получили необходимые санитарно-защитные зоны, исключающие загрязнение поверхностных и подземных вод.

На итоговой карте (рис. 3) были выделены: 1) зона хозяйственной деятельности, соответствующая зоне оптимального возделывания полевых культур, страдающих от недостатка влаги в сухие годы во второй половине лета (участки со ступенями увлажнения 64–68, т. е. преимущественно влажнолугового увлажнения с почвами без признаков оглеения на достаточно дренированных территориях [27]); 2) водоохранная зона поверхностного стока, соответствующая пойменным

ландшафтам, находящимся в вещественно-энергетической взаимосвязи с русловыми стоками. На ней, согласно статье 65 Водного кодекса РФ [4], должен устанавливаться специальный режим хозяйственной деятельности; 3) водоохранная зона питания грунтовых вод, расположенная в местах локальных понижений рельефа, сток с которых, ожидаемо, будет проникать в глубь почвенно-грунтового слоя.

Что касается экологической ёмкости исследуемого водосбора, следует отметить, что на исследуемой территории чиновники по крестьянским делам закладывали примерно по 14 га удобной земли на крестьянскую душу [26], что должно было позволить крестьянам вести мелкотоварное производство. Сегодня под «удобной» землёй следует понимать не более 2/3 площади водосбора, а значит, по нормам столетней давности, экологическая ём-

кость исследуемого водосбора площадью 204 га не превышает 10 человек.

Заключение

На основе выявленного разнообразия ландшафтных ресурсов было смоделировано оптимальное распределение видов землепользования по водосбору. Применение предлагаемого метода позволяет обеспечить энергоэффективное использование ландшафтных ресурсов, а значит и устойчивое развитие природно-социальных систем, связанных с ним. В первую очередь метод следует рекомендовать для вновь вводимых в сельскохозяйственный оборот земель и буферных зон природоохранных территорий.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы повышения конкурентоспособности ТГУ проект № 8.1.32.2018, а также грантов РФФИ «Мол_а» № 14-05-31121, 14-05-00700.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ramamohana Rao P., Suneetha P. Land use modeling for sustainable rural development // International Journal of Science, Environment and Technology. – 2012. – V. 1. – № 5. – P. 519–532.
2. Мышляков С.Г., Глотов А.А. «Геоаналитика. Агро» – инновационное решение для сельскохозяйственного мониторинга. Геоаналитика. – М.: ООО «Компания Совзонд», 2015. – С. 58–62.
3. Докучаев В.В. Наши степи прежде и теперь // Избр. труды. – М.: Изд-во АН СССР, 1949. – С. 317–438.
4. Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 N 74-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации, 1995, N 47, ст. 4471.
5. Роль ландшафтной структуры поверхности суши в климатической системе / А.Б. Шмакин, А.Н. Кренке, Ю.А. Михайлов, Д.В. Турков // Известия АН СССР. Серия географическая. – 2001. – № 4. – С. 38–43.
6. Копысов С.Г., Ярлыков Р.В. Опыт организации гидролого-климатических наблюдений на малых модельных водосборах Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 12. – С. 115–121.
7. U.S. Geological Survey (USGS). URL: <http://usgs.gov> (дата обращения 22.08.2017).
8. An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639 / E. Rodriguez, C.S. Morris, J.E. Belz, E.C. Chapin, J.M. Martin, W. Daffer, S. Hensley. – Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, 2005. – 143 p.
9. ASTER GDEM, 2009. URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> (дата обращения 23.05.2017).
10. Burrough P., McDonnell R., Lloyd Ch. Principles of Geographical Information Systems. Oxford: OUP, 2015. – 432 p.
11. Satellite Image Analysis and Terrain Modelling. A practical manual for natural resource management, disaster risk and development planning using free geospatial data and software. Version 2. SAGA GIS 4+. 2017. URL: https://sagatutorials.files.wordpress.com/2016/02/saga_manual_english_cdu_june-2017.pdf (дата обращения 23.05.2017).
12. Мезенцев В.С. Гидрологические расчеты в мелиоративных целях. – Омск: Изд-во Омского СХИ, 1982. – 80 с.
13. Возобновляемые ресурсы тепловлагодобеспеченности Западно-Сибирской равнины и динамика их характеристик / И.В. Карнаевич, О.В. Мезенцева, Ж.А. Тусупбеков, Г.Г. Бикбулатова. – Омск: Изд-во Омского государственного аграрного университета, 2007. – 268 с.
14. Копысов С.Г. Параметрический учёт ландшафтных условий стока в методе гидролого-климатических расчётов // География и природные ресурсы. – 2014. – № 3. – С. 157–161.
15. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield / G. Zhou, X. Wei, X. Chen, P. Zhou, X. Liu, Yi. Xiao, G. Sun, D.F. Scott, Sh. Zhou, L. Han, Y. Su // Nature Communications. – 2015. – V. 6. – Article number 5918. – 9 p. DOI: 10.1038/ncomms6918
16. Beven K.J., Kirkby M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology // Hydrological Science Bulletin. – 1979. – № 24. – P. 43–69.
17. Böhner J., Selige T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation // SAGA-analyses and modelling applications / Eds. J. Böhner, K.R. Mcclay, J. Strobl. – Göttinger: Göttinger Geographische Abhandlungen, 2006. – V. 115. – P. 13–28.
18. A novel multiple flow direction algorithm for computing the topographic wetness index / B. Yong, L.L. Ren, Y. Hong, J.J. Gourley, X. Chen, Y.J. Zhang et al. // Hydrology Research. – 2012. – № 43 (1–2). – P. 135–145.
19. Topography Wetness Index Application in Flood-Risk-Based Land Use Planning / S.H. Pourali, C. Arrowsmith, N. Chrisman et al. // Appl. Spatial Analysis. – 2016. – № 9:39. – P. 39–54. URL: <https://doi.org/10.1007/s12061-014-9130-2> (дата обращения 23.05.2017).
20. Ерофеев А.А. Ландшафтно-экологический анализ бассейнов малых рек на основе геоинформационного моделирования (на примере малых рек Томска и его окрестностей): автореф. дис...канд. геогр. наук. – Томск, 2012. – 16 с.
21. Kopysov S.G., Erofeev A.A., Zemtsov V.A. Estimation of water balance over catchment areas taking into account the heterogeneity of their landscape conditions // International Journal of Environmental Studies. – 2015. – V. 72. – № 3. – P. 380–385. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/00207233.2015.1010876> (дата обращения 23.05.2017).
22. Специализированные массивы для климатических исследований. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения 23.05.2017).
23. Шашко Д.И. Агроклиматическое районирование СССР. – М.: Колос, 1967. – 336 с.
24. Odum E. P. Fundamentals of Ecology. 3rd ed. – Philadelphia (PA): W.B. Saunders Co., 1971. – 574 p.
25. Приходько Н.Н., Щадей В.В., Пищак Д.В. Проблемы рационального природопользования и экологической оптимизации ландшафтов Западной Украины // Проблемы региональной эко-

- логии. Вып. 2. Региональное природопользование: Сб. науч. ст. – Томск: Изд-во «Красное знамя», 1994. – С. 26–35.
26. ГАТО. Ф. 239. Оп. 1. Д. 457. Л. 18–40. URL: <http://peresele-nie.gato.tomica.ru/planning/document-71.html?left=60> (дата обращения 23.05.2017).
27. Раменский Л. Г. Проблемы и методы изучения растительного покрова. Избранные работы. – Л.: Наука, 1971. – 334 с.
28. Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model / T. Hickler, K. Vohland, J. Feehan, P.A. Miller, B. Smith, L. Costa, T. Giesecke, S. Fronzek, T.R. Carter, W. Cramer, I. Kühn, M.T. Sykes // *Global Ecology and Biogeography*. – 2012. – № 21. – P. 50–63.
29. Climate-vegetation modelling and fossil plant data suggest low atmospheric CO₂ in the late Miocene / M. Forrest, J.T. Eronen, T. Utescher, G. Knorr, C. Stepanek, G. Lohmann, T. Hickler // *Climate of the Past*. – 2015. – № 11. – P. 1701–1732. DOI: 10.5194/cp-11-1701-2015.
30. Копысов С.Г. Отражение экосистемных процессов в методе гидролого-климатических расчётов // Отражение био-, гео, антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове. – Томск: ИД ТГУ, 2015. – С. 417–421.
31. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» // СЗ РФ. 2002. № 2. Ст. 133.

Поступила 27.12.2017 г.

Информация об авторах

Ерофеев А.А., кандидат географических наук, доцент кафедры географии геолого-географического факультета Томского государственного университета; доцент кафедры геоинформатики и кадастра Института кадастра, экономики и инженерных систем в строительстве Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Копысов С.Г., кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории мониторинга лесных экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН; доцент кафедры гидрологии геолого-географического факультета Томского государственного университета.

Никифоров А.Н., младший научный сотрудник лаборатории мониторинга лесных экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

UDC 332.362

LANDSCAPE PHYSICAL APPROACH TO ZONING LAND USE STRUCTURE AT A SMALL WATERSHED

Alexander A. Erofeev^{1,2},
erofeew@yandex.ru

Sergey G. Kopysov^{1,3},
wosypok@mail.ru

Artem N. Nikiforov³,
a.nik-n@mail.ru

¹ Tomsk State University,
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya square, Tomsk, 634003, Russia.

³ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS,
10/3, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia

The relevance of the research is caused by the need to optimize the current land use for providing sustainable ecological and social development.

The aim of the study is to develop the sustainable and optimal organization of landscape structure on the level of a small watershed to take into account spatially-distributed microclimatic conditions for the most effective their use in accordance with dynamic of natural processes at watershed area.

The methods: the synthesis of geophysical research methods, in particular the method of hydro-climatic calculations, with the method of relief quantitative description on the basis of digital elevation models (Geomorphometry). The authors have calculated a number of hydro circulating and solar indicators of relief influence on diversity of landscape conditions of runoff formation. The variety in the growing conditions at different relief forms was accounted on the basis of the method of hydro-climatic calculations with moisture ranges by the Ramenskiy scale integration. They characterize the habitat conditions on the vegetation structure. The automated monitoring of water runoff was organized as well to specify the modelled calculations and some other water-balanced elements at the study area.

The results. The optimal distribution of land use types was modeled on the basis of detected diversity at the studied watershed. The watershed ecological capacity was defined according to water consumption. The application of the proposed method allows providing the effective using of landscape resources as well as the sustainable development of natural and social systems. This method should be recommended first of all for lands newly introduced in agriculture and buffer zones of conversation areas.

Key words:

Land use, landscape physics, water balance, hydro-climatic calculation method, geomorphometry, Western Siberia.

The research was financially supported by the RFBR grants no. 14–05–31121 Mol_a, 14–05–00700.

REFERENCES

- Ramamohana Rao P., Suneetha P. Land use Modeling for sustainable rural development. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 2012, vol. 1, no. 5, pp. 519–532.
- Myshlyakov S., Glotov A. «Geoanalitika. Argo» – innovatsionnoe reshenie dlya selskokhozyaystvennogo monitoringa. *Geomatika* [«Geoanalytics. Argo» is an innovative solution for Agricultural Monitoring. Geomatics]. Moscow, Kompaniya Sovzond Publ., 2015. pp. 58–62.
- Dokuchaev V.V. Nashi stepi prezhde i teper [Our steppes in the past and at the present time]. *Izbrannyye trudy*. Moscow, AN USSR Press, 1949. pp. 317–438.
- Vodny kodeks Rossiyskoy Federatsii from 03.06.2006 № 74-FZ [The Water Code of the Russian Federation from 03.06.2006 № 74]. *Sobranie zakonodatelstva RF*, 1995 № 47 st. 4471 [Collection of the legislation of the Russian Federation].
- Shmakina A.B., Krenke A.N., Mikhaylov Yu.A., Turkov D.V. Rol landshaftnoy struktury poverkhnosti sushy v klimaticheskoy sisteme [Role of landscape structure of terrestrial surface in climatic system]. *Izvestiya AN USSR. Seriya geograficheskaya*, 2001, no. 4, pp. 38–43.
- Kopysov S.G., Yarlykov R.V. Experience in organization of hydrological and climatic observations on small model catchments of West Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 12, pp. 115–121. In Rus.
- U.S. Geological Survey (USGS). Available at: <http://usgs.gov> (accessed 22 August 2017).
- Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. *An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639*. Pasadena, California, Jet Propulsion Laboratory, 2005. 143 p.
- ASTER GDEM, 2009. Available at: <http://gdem.ersdac.jp> (accessed 23 May 2017).
- Burrough P., McDonnell R., Lloyd Ch. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford, OUP, 2015. 432 p.
- Satellite Image Analysis and Terrain Modelling. A practical manual for natural resource management, disaster risk and development planning using free geospatial data and software. Version 2. SAGA GIS 4+*. 2017. Available at: https://sagatutorials.files.wordpress.com/2016/02/saga_manual_english_cdu_june-2017.pdf (accessed 23 May 2017).
- Mezentsev V.S. *Gidrologicheskie raschety v meliorativnykh tselnykh* [Hydrological calculations for melioration]. Omsk, Omsk Agricultural Institute Publ., 1982. 80 p.
- Karnatsevich I.V., Mezentseva O.V., Tusupbekov G.A., Bikbulatova G.G. *Vozobnovlyayemye resursy teplolagoobespechennosti*

- Zapadno-Sibirskoy ravniny i dinamika ikh kharakteristik* [Study of dynamics and mapping of elements of energy and water balance and characteristics of energy and water availability]. Omsk, Omsk State Agricultural University Press, 2007. 268 p.
14. Kopysov S.G. Parametric account of landscape conditions of flow in the method of hydrology-climatic calculations. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2014, no. 3, pp. 157–161. In Rus.
 15. Zhou G., Wei X., Chen X., Zhou P., Liu X., Xiao Yi., Sun G., Scott D.F., Zhou Sh., Han L., Su Y. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield. *Nature Communications*, 2015, vol. 6, Article number 5918, 9 p. DOI: 10.1038/ncomms6918
 16. Beven K.J., Kirkby M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Science Bulletin*, 1979, no. 24, pp. 43–69.
 17. Böhner J., Selige T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. *SAGA-Analyses and modelling applications*. Eds. J. Böhner, K.R. McCloy, J. Strobl. Göttinger, Göttinger Geographische Abhandlungen, 2006, vol. 115, pp. 13–28.
 18. Yong B., Ren L.L., Hong Y., Gourley J.J., Chen X., Zhang Y.J. A novel multiple flow direction algorithm for computing the topographic wetness index. *Hydrology Research*, 2012, no. 43 (1–2), pp. 135–145.
 19. Pourali S.H., Arrowsmith C., Chrisman N. Topography Wetness Index Application in Flood-Risk-Based Land Use Planning. *Appl. Spatial Analysis*, 2016, no. 9:39, pp. 39–54. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12061-014-9130-2> (accessed 23 May 2017).
 20. Erofeev A.A. *Landshaftno-ekologicheskyy analiz basseynov malyykh rek na osnove geoinformatsionnogo modelirovaniya (na primere malyykh rek Tomsk i ego okrestnostey)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Landscape and ecological analysis of small rivers watersheds on the basis of GIS-based modelling. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2012. 16 p.
 21. Kopysov S.G., Erofeev A.A., Zemtsov V.A. Estimation of water balance over catchment areas taking into account the heterogeneity of their landscape conditions. *International Journal of Environmental Studies*, 2015, vol. 72, no. 3, pp. 380–385. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/00207233.2015.1010876> (accessed 23 May 2017).
 22. *Specializirovannyye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy* [Specialized data for climatic research]. Available at: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (accessed 23 May 2017).
 23. Shashko D.I. *Agroklimaticheskoe rayonirovanie USSR* [Agro climatic zoning of the USSR]. Moscow, Kolos Publ., 1967. 336 p.
 24. Odum E.P. *Fundamentals of Ecology*. 3rd ed. Philadelphia (PA), W.B. Saunders Co., 1971. 574 p.
 25. Prikhodko N.N., Shalday V.V., Pishchak D.V. Problemy ratsionalnogo prirodopolzovaniya i ekologicheskoy optimizatsii landshaftov Zapada Ukrainy [Issues of rational nature management and ecological optimization of the west of Ukraine landscapes]. *Problemy regionalnoy ekologii. Vypusk 2. Regionalnoe prirodopolzovanie: Sbornik nauchnykh statey* [Problems of regional ecology. Iss. 2. Regional environmental management]. Tomsk, Krasnoe znamya Publ., 1994. pp. 26–35.
 26. *GATO. F. 239. Op. 1. D. 457. L. 18–40*. Available at: <http://pereselenie.gato.tomica.ru/planning/document-71.html?left=60> (accessed 23 May 2017).
 27. Ramensky L.G. *Problemy i metody izucheniya rastitelnogo pokrova. Izbrannyye raboty* [Issues and methods of vegetation cover study]. Leningrad, Nauka Publ., 1971. 334 p.
 28. Hickler T., Vohland K., Feehan J., Miller P.A., Smith B., Costa L., Giesecke T., Fronzek S., Carter T.R., Cramer W., Kühn I. and Sykes M.T. Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, no. 21, pp. 50–63.
 29. Forrest M., Eronen J.T., Utescher T., Knorr G., Stepanek C., Lohmann G., Hickler T. Climate-vegetation modelling and fossil plant data suggest low atmospheric CO₂ in the late Miocene. *Climate of the Past*, 2015, no. 11, pp. 1701–1732. DOI: 10.5194/cp-11-1701-2015
 30. Kopysov S.G. Otrazhenie ekosistemnykh protsessov v metode gidrologo-klimaticheskikh raschetov [Reflection of ecosystem processes in hydro-climatic calculation method]. *Otrazhenie bio-, geo-, antroposfernykh vzaimodeystviy v pochvakh i pochvennom pokrove* [Reflection of bio-, geo- anthropospheric interactions in soils and soil covers]. Tomsk, TGU Publ. house, 2015. pp. 417–421.
 31. Federalnyy zakon ot 10.01.2002 № 7-FZ «Ob okhrane okruzhayushchey sredy» [Federal Law of 10.01.2002 No. 7 On Protection of Environment]. *Sobranie zakonodatelstva RF*, 2002 № 2, st. 133 [Collection of the legislation of the Russian Federation].

Received: 27 December 2017.

Information about the authors

Alexander A. Erofeev, Cand. Sc., associate professor, Tomsk State University; associate professor, Tomsk State University of Architecture and Building.

Sergey G. Kopysov, Cand. Sc., lead researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS; associate professor, Tomsk State University.

Artem N. Nikiforov, junior researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS.

УДК 528.88:528.936

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ЗЕМЕЛЬ И ОЦЕНКА ДИНАМИКИ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТЕРРИТОРИЮ САХАЛИНА

Мелкий Вячеслав Анатольевич¹,
vamelkiy@mail.ru

Верхотуров Алексей Александрович¹,
ussr-91@mail.ru

Попова Яна Павловна¹,
yana-b@inbox.ru

Бурькин Александр Николаевич¹,
burykinsfamily@bk.ru

¹ Сахалинский государственный университет,
Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 2.

Актуальность работы обусловлена необходимостью отслеживать изменения природной среды под влиянием антропогенного воздействия, особенно в селитебных зонах, а также обеспечивать надлежащую оценку земельных участков.

Цель работы: обоснование концептуальных и технологических основ для разработки системы мониторинга земель и динамики антропогенного воздействия на территорию с целью картографирования и кадастровой оценки.

Методы исследования: дешифрирование материалов дистанционного зондирования; полевые маршрутные наблюдения на эталонных тестовых участках; метод ландшафтного анализа; метод системного картографирования; анализ тематических карт различного масштаба; картометрические исследования на основе геоинформационных технологий.

Результаты. Приводятся результаты исследований характера изменений антропогенной нагрузки на ландшафты Сахалина на основе картометрического анализа лесопокрытых территорий, вырубок, а также селитебных территорий на картах масштаба 1:100000, изданных в середине 80-х гг. XX в., и космических снимках, переданных со сканирующих устройств спутников Landsat-7, Landsat-8, с разрешением 15–30 м. Выявлены тенденции к изменению площади различных видов ландшафтов и населенных пунктов на островной территории. Ландшафты юга Сахалина подвергаются изменениям при развитии лесопользования, недропользования, водопользования. Промышленно ценные леса в доступных районах большей частью сильно изменены. Однако лесопользование возможно при условии обеспечения экологической безопасности и воспроизводства возобновляемых лесных ресурсов региона. Селитебная нагрузка в юго-восточной части Сахалина относительно невелика. Увеличение площади Южно-Сахалинска происходит не за счет многоэтажного строительства, а за счет индивидуального жилищного строительства. Возможности ArcGIS позволяют дать оценку прироста городской территории по отдельным районам города.

Выводы. Выявлено, что за время, прошедшее между топографической и космической съемками, селитебная нагрузка на равнинные ландшафты возросла практически на всей территории, и особенно вблизи селитебных зон юга Сахалина. Мониторинг состояния природной среды позволяет своевременно обнаруживать воздействие на экосистемы и проводить мероприятия по сокращению негативных последствий.

Ключевые слова:

Мониторинг окружающей среды, природопользование, картографирование, кадастр природных ресурсов, дистанционное зондирование.

Введение

Общую характеристику почвенно-растительного покрова, распространенного в любом регионе мира, можно уверенно выполнить по данным аэрокосмических съемок, обеспечивающих охват регионального масштаба, при котором отображаются горные хребты, большие равнины, водосборные бассейны крупных рек. Обычно космическая видеoinформация такого рода с пространственным разрешением 50–100 м привязывается к мелкомасштабной топографической основе (1:100000–1:200000).

Корректную оценку земель и динамику воздействия на них активных природных процессов и производственной деятельности (разрастание селитебных территорий, строительство крупных промышленных комплексов, прокладка трубопроводов, вулканогенное и сейсмическое воздействие) можно произвести, выполнив анализ среднemas-

штабных изображений (1:100000–1:25000) с обзорностью локального охвата, с разрешением 10–30 м [1–4].

Изменчивость факторов, определяющих антропогенную нагрузку

Антропогенная нагрузка на ландшафты любой территории возрастает с увеличением численности населения и расширением производства. Никого не удивляет тот факт, что население России является наиболее приспособленным к жизни в условиях холодного климата. Почти 80 % всего населения северных территорий – россияне: их здесь проживает более 12 млн человек. Освоение Крайнего Севера, начавшееся в России еще в XII в. с целью расширения сферы меновой торговли и развития пушного промысла, со временем последовательно дополнялось деятельностью по созданию

коммуникаций, аграрно-земледельческих хозяйств, а затем и предприятий по добыче и переработке природных ресурсов. Все эти преобразования требовали и требуют масштабных инвестиций. В сложных климатических условиях находятся также северные районы Аляски, Норвегии, Швеции. В этих странах для привлечения населения в неосвоенные районы применяют налоговые льготы и субсидии. Эти же меры используются в условиях Крайнего Севера России. Однако меры, направленные на сохранение населения на этих территориях, не всегда достигают цели.

Реакцией на воздействие экономических или иных факторов, обеспечивающих комфортность пребывания на территории, практически всегда является возникновение миграционных потоков, приводящих к притоку или же оттоку населения. На изменение численности населения в Сахалинской области влияли разнообразные причины (ссылка каторжан, активный отъезд во время русско-японской войны, прекращение миграции в гражданскую войну, организованный набор рабочих на предприятия Северного Сахалина, репатриация японских граждан, предоставление льгот переселенцам с материка), анализ которых представляет большое поле для специальных исследований [5, 6]. В данной работе мы лишь воспользуемся сведениями об изменении численности населения в области на протяжении XX в. (табл. 1) [7–12].

Можно констатировать тот факт, что, несмотря на общие тенденции роста или уменьшения численности населения в Сахалинской области, население Южно-Сахалинска постоянно увеличивалось. Уменьшение числа жителей из-за отъезда во время войн быстро компенсировалось за счет лиц, приезжающих по наборам специалистов для предприятий, а также за счет переселения сельских жителей в областной центр.

Увеличение численности населения и трудовых ресурсов позволяет развернуть производственную деятельность. Интенсификация техногенного воздействия на природную среду влечет за собой усиление негативных процессов, приводящих к деформации экосистем и природно-техногенных комплексов. Ландшафты Сахалина, как составляющие части экосистем, подвергаются изменениям в результате человеческой деятельности: землепользования (заселения территории, развития дорожной сети и сельского хозяйства), лесопользования, недропользования (добычи полезных иско-

паемых в карьерах и на нефтепромыслах), водопользования (добычи водно-биологических ресурсов).

Оценка состояния земель исследуемой территории

Муниципальное образование (МО) «Корсаковский городской округ» расположено на юге острова Сахалин на площади 2623 км². Население этого МО проживает в 19 населенных пунктах. Город Корсаков занимает площадь 26 км². Сельские поселения в районе разместились на 20 км². На селитебную зону МО в целом приходится примерно 1,8 % от всей исследуемой территории.

Селитебные земли на юге Сахалина встречаются в пределах различных классов ландшафтов. Поселения на этой территории практически всегда размещались на равнинах, примыкающих к озерам и долинам рек (рис. 1, табл. 2) [13, 14].

На юге острова наибольшей трансформации из природных ресурсов подвергались леса. Интенсивное лесопользование на протяжении прошлого столетия привело к тому, что большая часть промышленно ценных лесных массивов в доступных местах сильно изменена. Как показывает выполненный анализ, значительную часть исследуемой территории занимают пустыри, гари, заболоченные безлесные равнины и предгорья, бамбуковые заросли, а также массивы лесов, возникших в результате сукцессий, представленных малоценными породами (ива, ольха, береза, осина). Больших, не изреженных промышленными рубками и пожарами, лесов в районе практически не осталось. Использование лесов лесозаготовительными предприятиями в таких условиях неизбежно приведет к усугублению экологических проблем. Реализация новых проектов лесопользования должна сопровождаться мероприятиями по обеспечению экологической безопасности и воспроизводству возобновляемых ресурсов.

Большинство ландшафтов аллювиальных и эрозионно-аллювиальных равнин, покрытых лесной интразональной будь то ивово-ольховой или же пихтовой, еловой, кедровостланниковой растительностью, изученные во время экспедиционных работ, можно отнести к категории средне- и сильноизмененных (рис. 2) [15]. Основной вид антропогенной нагрузки – вырубка леса, которая практически прекратилась в последние десятилетия. Ландшафты пострадали от потери лесного покрова, но не утратили свой восстановительный потенциал. Почвенный покров практически не нару-

Таблица 1. Численность населения Сахалинской области и города Южно-Сахалинска

Table 1. Population of the Sakhalin region and Yuzhno-Sakhalinsk

Год/Year	1897	1913	1926	1939	1959	1970	1979	1989	1997	2010	2015	2017
Область, тыс. чел. Region, thousand people	28,1	север north 8,1	север north 12,0	север north 100,0	649,4	615,7	654,9	710,0	612,3	498,0	488,4	487,3
Город, тыс. чел. Town, thousand people	0,130	(1908) 3,7	(1925) 15,3	(1935) 28,5	85,5	105,8	140,0	159,3	181,0	181,7	192,8	194,9

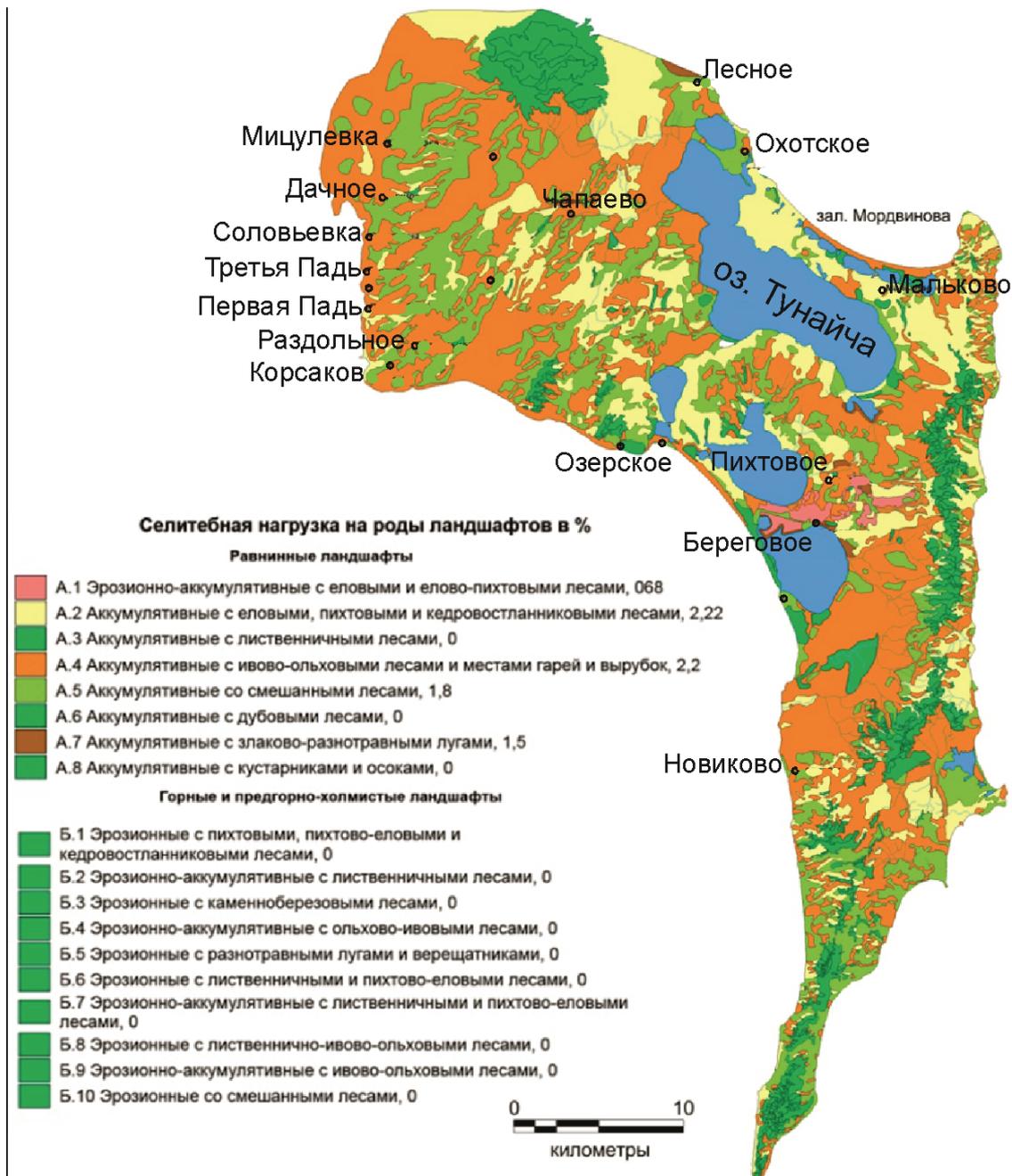


Рис. 1. Распределение селитебной нагрузки по родам ландшафтов юго-восточного Сахалина, по Я.П. Беляниной [13]

Fig. 1. Distribution of residential load on the landscapes of South-Eastern Sakhalin, by Ya.P. Bilyanina [13]

шался, и на территории есть все условия для активного восстановления растительности, типичной для ландшафтов района.

Результаты обработки данных мониторинга природной среды и техносферы, осуществляемого с применением космических методов [16–18], позволили произвести оценку состояния земель и составить картосхемы, которые представлены в статье на примерах лесных массивов, сильно нарушенных в период интенсивного лесопользования,

а также роста Южно-Сахалинска. Наглядно показано, что данные космических съемок позволяют извлекать информацию, которая может быть использована при стратегическом планировании промышленного использования, развития населенных пунктов, а также для предотвращения экологических и, как следствие, социально-экономических катастроф. Подробно вопросы организации мониторинга, городских земель, их картографирования рассмотрены в работах А.П. Сизова [19, 20].

Таблица 2. Распределение селитебных зон по территории различных классов ландшафтов в МО «Корсаковский городской округ» [13]

Table 2. Distribution of residential areas on the territory of different classes of landscapes in the municipality «Korsakov urban district» [13]

Классы ландшафтов Classes of landscapes	Площадь ландшафтов, км ² Landscape area, km ²	Количество населенных пунктов Amount of settlements	Площадь селитебных зон, км ² Residential zones area, km ²	В % от общей площади In % to total area
Равнинные/Plain	2013,6	19	46,0	22,8
Низкогорные и предгорные холмистые Low-mountain and hilly piedmont	251,4	0	0	0
Водные объекты Water objects	369,0	0	0	0
Всего/In all	2623,0	19	46,0	22,8

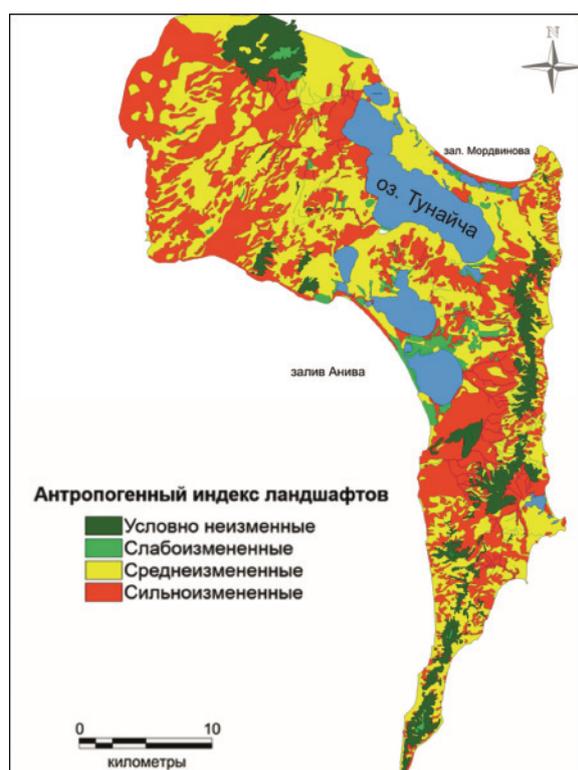


Рис. 2. Антропогенная трансформация ландшафтов, по Я.П. Беляниной [13]

Fig. 2. Anthropogenic transformation of landscapes, by Ya.P. Bilyanina [13]

Оценка динамики роста городского округа «город Южно-Сахалинск»

Для составления мониторинговых карт крупного масштаба 1:25000–1:50000 и крупнее должны использоваться спутники с высокой разре-

шающей способностью от 0,5 до 15 м. Наиболее оптимально использовать для дешифрирования спектральные диапазоны 0,4–1,1 и 10–12 мкм, а также микроволновой [21–24]. Для выделения застроенных и активно используемых земель целесообразно применять снимки, выполненные в зеленой и ИК-зонах [25–28]. Анализ результатов дешифрирования и архивных картографических материалов, составленных по данным топографических съемок, выполненных в начале 80-х гг. XX в., позволил составить результирующую карту динамики роста городского округа «город Южно-Сахалинск» (рис. 3).



Рис. 3. Картограмма динамики роста городского округа «Город Южно-Сахалинск»

Fig. 3. Map of the growth dynamics of the urban district «City of Yuzhno-Sakhalinsk»

Площадь селитебной территории к 2015 г. составила 9765,61 га против 8058,82 га в 1984 г., то есть по площади город увеличился на 1706,79 га или на 21,18 %. Следует отметить, что большая часть этого прироста приходится не на многоквартирные строения, а на индивидуальное жилищное строительство. Возможности ArcGIS позволяют

дать оценку прироста городской территории по отдельным районам города (табл. 3).

Таблица 3. Площадь селитебной территории г. Южно-Сахалинск по отдельным районам за 1984 и 2015 гг.

Table 3. Residential area of Yuzhno-Sakhalinsk by selected districts in 1984 and 2015

Районы города Districts of the city	Площадь селитебных территорий, га Area of habitable territories, hectare	
	1984	2015
Центральный/Central	3063,4	3231,01
Березняки/Bereznyaki	311,06	343,96
Владимировка/Vladimirovka	962,58	1671,52
Дальнее/Dalnee	410,92	450,68
Ключи/Klyuchi	386,57	394,6
Луговое/Lugovoye	454,38	458,99
Новая деревня/Novaya derevnya	63,17	74,33
Новоалександровск/Novoaleksandrovsk	696,86	730,81
Октябрьское и Земляничные холмы Oktjabrskoe and Zemlyanichnye kholmy	56,57	638,02
Синегорск/Sinegorsk	284,77	284,77
Старорусское/Staroruskoe	236,90	236,9
Хомутово и Лиственничное Khomutovo and Listvennichnoe	1131,64	1250,02
Всего/In all	8058,82	9765,61

В результате проведенных исследований установлено, что антропогенная и селитебная нагрузка на экосистемы юга острова Сахалин возрастала или убывала вслед за ростом – убылью населения и разрастанием или деградацией отраслей производства.

Японский опыт, а затем и реализация нефтегазовых шельфовых проектов показали, что на острове возможно ведение самодостаточного эффективного хозяйства. Идет активная борьба за отечественные и иностранные инвестиции. Самым большим дефицитом на острове по-прежнему остаются трудовые ресурсы. Роль внешнеэкономического сотрудничества возрастает. Лесные, рыбные и топливно-энергетические ресурсы в условиях расширения сотрудничества в Азиатско-Тихоокеанском регионе обретают международное значение.

Анализ социально-экономического развития территории в прошлом показал, что производственные объекты, построенные в период японского освоения, успешно эксплуатировались до само-

го вступления страны в рыночные отношения. По сей день наибольший интерес на сахалинской земле представляют топливно-энергетические, лесные и рыбные ресурсы.

Выводы

Ландшафтно-экологические особенности и природно-ресурсный потенциал территории способны обеспечить развитие определенных видов природопользования. Определив все допустимые виды природопользования и эколого-географические ограничения на основании геосистемных исследований [29, 30], можно уверенно прогнозировать развитие оптимальной структуры многоотраслевого производственно-территориального комплекса [31].

Для формирования конкурентоспособного человеческого капитала, который позволит развернуть эффективный производственный комплекс, необходимо обеспечить комфортное и безопасное проживание на островах, повышение качества жизни, опережающее развитие отраслей социальной сферы, осуществление протекционистской, социальной региональной политики всеми ветвями государственной и муниципальной власти области.

Экологический мониторинг – важный элемент, являющийся основой для обеспечения контроля и внедрения мер по уменьшению негативного воздействия на природу острова при интенсификации экономического развития. Система мониторинга, в первую очередь, должна обеспечивать пространственную привязку данных о наблюдаемых объектах к топографической основе [32]. Комплексные и регулярные наблюдения способствуют выявлению опасных процессов, развивающихся в пределах различных ландшафтов [33–40] и на трассах трубопроводов [41]. Следует отметить, что население Южно-Сахалинска постоянно увеличивалось, несмотря на общие миграционные тенденции притока или оттока населения на острове Сахалин. В последнее время площадь города прирастает за счет малоэтажной застройки. Оперативный мониторинг состояния природной среды позволяет принять меры по снижению негативного воздействия на экосистемы и селитебные зоны, существенно сокращает риски воздействия катастрофических процессов, а следовательно, повышает уверенность в завтрашнем дне островного края.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами / В.А. Малинников, А.Ф. Степенко, А.Е. Алтынов, С.М. Попов. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2009. – 140 с.
2. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований. 2-е изд. – М.: ИЦ «Академия», 2011. – 416 с.
3. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические методы дистанционного зондирования Земли. – М.: Изд-во «А и Б», 1997. – 296 с.
4. Мелкий В.А. Разработка теории аэрокосмического мониторинга вулканопасных территорий // Геодезия и картография. – 2000. – № 11. – С. 52–53.
5. Бурькин А.Н. Государственное региональное управление и формирование постоянного населения Сахалинской области (история и современность): монография. – М.: Изд-во «Спутник +», 2009. – 244 с.
6. Бурькин А.Н. Гуманизация государственного регионального управления как смысл и основное содержание стратегии социально-экономического развития Сахалинской области: монография. – М.: Изд-во «Спутник +», 2009. – 444 с.
7. Первая Всеобщая перепись населения Российской империи 1897 г. / под ред. Н.А. Тройницкого. В 89 вып. Вып. 77. Остров Сахалин. – СПб.: Центральный статистический комитет Министерства внутренних дел, 1899. – 16 с.
8. Население России за 100 лет (1897–1997): Стат. сб. / под ред. Ю.А. Юркова, В. Л. Соколова. – Госкомстат России. – М., 1998. – 222 с.
9. Администрация губернаторства Карафуто. Результаты переписи 1925 года: Домовладения и численность населения. – Тоёхара, 1926. – 30 с.
10. Администрация губернаторства Карафуто. Результаты переписи 1935 года: Домовладения и численность населения. – Тоёхара, 1936. – 25 с.
11. Предварительные итоги Всероссийской переписи населения 2010 года: Стат. сб. – М.: ИИЦ «Статистика России», 2011. – 87 с.
12. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2017 г. (31 июля 2017) // Сайт Федеральной службы государственной статистики. URL: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2017/bul_dr/mun_obr2017.rar (дата обращения 01.11. 2017).
13. Белянина Я.П. Ландшафты юго-восточной части острова Сахалин // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2015. – № 3 (32). – С. 87–92.
14. Белянина Я.П. Ландшафтно-функциональное зонирование территории памятника природы «Лагуна Буссе» острова Сахалин // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2015. – № 1 (30). – С. 67–72.
15. Заурбеков Ш.Ш., Братков В.В., Бекмурзаева Л.Р. Геоэкологическая оценка антропогенной модификации ландшафтов Чеченской Республики // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2010. – № 1. – С. 86–91.
16. Amarnath G., Babar S., Murthy M.S.R. Evaluating MODIS-vegetation continuous field products to assess tree cover change and forest fragmentation in India – a multi-scale satellite remote sensing approach // Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. – 2017. – V. 20. – Iss. 2. – P. 157–168.
17. Mapping Global Forest Aboveground Biomass with Spaceborne LiDAR, Optical Imagery, and Forest Inventory Data / T. Hu, Y. Su, B. Xue, J. Liu, X. Zhao, J. Fang, Q. Guo // Remote Sensing. – 2016. – V. 8. – Iss. 7. – P. 565.
18. Forest growing stock volume of the northern hemisphere: Spatially explicit estimates for 2010 derived from Envisat ASAR / M. Santoro, A. Beaudoin, C. Beer, O. Cartus, J. Fransson, R. Hall, C. Pathe, C. Schmullius, D. Schepaschenko, A. Shvidenko, M. Thurner, U. Wegmüller // Remote Sensing of Environment. – 2015. – V. 168. – P. 316–334.
19. Сизов А.П. Мониторинг и охрана городских земель. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2009. – 264 с.
20. Сизов А.П. Оценка качества и мониторинг земель сверхкрупного города (на примере Москвы): монография. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2012. – 242 с.
21. Molingreau J.P. Global vegetation dynamics: satellite observation over Asia // International Journal of Remote Sensing. – 1986. – V. 7 (9). – P. 1121–1146.
22. Richards J.A. Remote Sensing Digital Image Analysis. – Berlin: Springer-Verlag, 1993. – 250 p.
23. Emery W.J., Thomas A.C., Collins M.J., Crawford W.R., Mackas D.L. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images / W.J. Emery, A.C. Thomas, M.J. Collins, W.R. Crawford, D.L. Mackas // Journal of Geophysical Research. – 1986. – V. 91. – № C11. – P. 12865–12878.
24. Gauslaa Y. Infrared and visible reflectance in different lichen species and its ecological significance // Holarctic Ecology. – 1984. – № 7 (1). – P. 13–22.
25. Экология Севера: Дистанционные методы изучения нарушенных экосистем (на примере Кольского полуострова). Коллективная монография / Е.И. Голубева, А.П. Капица, В.И. Кравцова, А.В. Краснушкин, И.К. Лурье, В.В. Малышев, У.Г. Рис, О.А. Тутубалина и др. / под ред. А.П. Капицы, У.Г. Риса. – М.: Научный мир, 2003. – 248 с.
26. Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Loupian E.A. Mapping of arable land in Russia using multi-year time series of MODIS data and the LAGMA classification technique // Remote Sensing Letters. – 2016. – V. 7. – Iss. 3. – P. 269–278.
27. Batjes N.H. Soil data resources for land suitability assessment and environmental protection in Central and Eastern Europe: the 1:2500000 scale SOVEUR project // The Land. – 2001. – № 5. – P. 51–68.
28. Sinha S., Sharma L.K., Nathawat M.S. Improved land-use/land-cover classification of semi-arid deciduous forest landscape using thermal remote sensing // Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. – 2015. – V. 18. – Iss. 2. – P. 217–233.
29. Neef E. Die Stellung der Landschaftsökologie in der physischen Geographie // Geographische Berichte. – 1962. – V. 4. – P. 349–356.
30. Neef E. Die theoretischen Grundlagen der Landschaftlehre. – Leipzig: Gotha, 1967. – 152 p.
31. Качур А.Н., Бакланов П.Я. Эколого-географические проблемы и ограничения в региональном развитии // Геосистемы Дальнего Востока России на рубеже XX–XXI веков: в 3-х т. Т. 3. Территориальные социально-экономические структуры / колл. авторов; отв. ред. акад. П.Я. Бакланов, д.г.н. М.Т. Романов. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – С. 111–118.
32. Карпик А.П., Аврунев Е.И., Варламов А.А. Совершенствование методики контроля качества спутникового позиционирования при создании геоинформационного пространства территориального образования // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № S4. – С. 182–186.
33. Atayev Z.V., Bratkov V.V. Modern Trends of Change of Residential Development of the Landscapes of Dagestan // European Geographical Studies. – 2014. – № 1 (1). – P. 4–11.
34. Bratkov V.V., Atayev Z.V. The Current Trends in the Residential Development of Landscape and Geomorphological Tiers of the Republic of Dagestan // European Researcher. – 2015. – V. 93. – Iss. 4. – P. 282–289.
35. Дистанционное зондирование территории Северного Кавказа / В.В. Братков, Ш.Ш. Заурбеков, П.В. Клошин, А.Н. Марьин // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2011. – № 4 (76). – С. 69–80.

36. Лисицкий Д.В., Мурзинцев П.П. Геодезический мониторинг территорий // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 116–118.
37. Dozier J. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution // Remote Sensing of Environment. – 1981. – V. 11. – P. 221–229.
38. Белорусцева Е.В., Шаповалов Д.А. Мониторинг хозяйственного использования земель сельскохозяйственного назначения нечерноземья // Проблемы региональной экологии. – 2016. – № 1. – С. 116–122.
39. The solutions of the agricultural land use monitoring problems / V.V. Vershinin, A.A. Murasheva, V.A. Shirokova, A.O. Khutorova, D.A. Shapovalov, V.A. Tarbaev // International Journal of Environmental and Science Education. – 2016. – V. 11. – № 12. – P. 5058–5069.
40. Bondur V.G. Satellite Monitoring of Wildfires during the Anomalous Heat Wave of 2010 in Russia // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2011. – V. 47. – № 9. – P. 1039–1048.
41. Экологический мониторинг и мероприятия по снижению уровня возможного негативного воздействия трубопроводов (проект «Сахалин 2») на окружающую среду острова Сахалин / В.А. Мелкий, А.А. Верхотуров, Д.В. Долгополов, А.Н. Бурькин, В.В. Ильин, А.А. Гальцев, О.М. Зарипов, Д.Г. Новиков, Я.П. Беянина, И.В. Еременко // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 4. – С. 101–108.

Поступила 15.12.2018 г.

Информация об авторах

Мелкий В.А., доктор технических наук, заведующий кафедрой геологии и нефтегазового дела, директор Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета.

Верхотуров А.А., старший преподаватель кафедры геологии и нефтегазового дела Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета.

Попова Я.П., кандидат географических наук, доцент кафедры геологии и нефтегазового дела Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета.

Бурькин А.Н., кандидат экономических наук, доцент кафедры строительства Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета.

UDC 528.88:528.936

MONITORING OF LAND STATUS AND ASSESSMENT OF DYNAMICS OF ANTHROPOGENIC IMPACT ON THE TERRITORY OF SAKHALIN

Vyacheslav A. Melkiy¹,
vamelkiy@mail.ru

Alexey A. Verkhoturov¹,
ussr-91@mail.ru

Yana P. Popova¹,
yana-b@inbox.ru

Alexander N. Burykin¹,
burykinsfamily@bk.ru

¹ Sakhalin State University,
2, Pogranichnaya street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia.

The relevance of the work is caused by the need to track the changes in natural environment to anthropogenic impacts, especially in residential areas, and ensure proper valuation of land.

The main aim of the study is substantiation of conceptual and technological foundations for creation of monitoring system of the land and the dynamics of the anthropogenic impact on the territory for mapping and cadastral valuation.

The methods: interpretation of remote sensing data; route field observations on the reference test sites; method of landscape analysis; method of systemic mapping; analysis of thematic maps of different scale; cartometrics research based on geoinformation technologies.

The results. The paper introduces the results of studying the nature of the changes of anthropogenic load on the landscapes of Sakhalin on the basis of cartometric analysis of forest-covered areas, logging, and residential areas by maps in scale 1:100000, published in the mid 1980-s and by space images transmitted from scanner Landsat-7, Landsat-8 with a resolution of 15–30 m. The authors identified the trends to change in the area of different types of landscapes and settlements in the island territory. Landscapes of the south of Sakhalin was subjected to change during the development of forest management, mining, water management. Valuable industrial forests in accessible areas are essentially heavily modified. However, forest management is possible under condition of ensuring environmental safety and reproduction of renewable forest resources in the region. Residential load in the South-Eastern part of Sakhalin is relatively low. The increase in the area of Yuzhno-Sakhalinsk is not due to multi-storey construction, but due to individual housing construction. The capabilities of ArcGIS allow assessing the growth of the urban area on individual areas of the city.

Summary. The authors revealed that for the time between the topographic and space shooting, the residential load on plain type landscapes has increased almost throughout, and especially near residential zones of southern Sakhalin. Environment monitoring allows discovering quickly the effects on the ecosystem and carrying out the actions to reduce negative consequences.

Key words:

Environmental monitoring, environmental management, mapping, cadastre, natural resources, remote sensing.

REFERENCES

1. Malinnikov V.A., Stetsenko A.F., Altynov A.E., Popov S.M. *Monitoring prirodnoy sredy aerokosmicheskimi sredstvami* [Environmental Monitoring of aerospace surveillance]. Moscow, MIIGAiK Publ., 2009. 140 p.
2. Knizhnikov Yu.F., Kravtsova V.I., Tutubalina O.V. *Aerokosmicheskie metody geograficheskikh issledovaniy* [Aerospace methods of geographical research]. Moscow, Akademiya Publ., 2011. 416 p.
3. Garbuk S.V., Gershenson V.E. *Kosmicheskie metody distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Space methods of remote sensing]. Moscow, A i B Publ., 1997. 296 p.
4. Melkiy V.A. *Razrabotka teorii aerokosmicheskogo monitoringa vulkanoopasnykh territoriy* [The development of the theory of space monitoring of territories with volcanic dangers]. *Geodeziya i kartografiya*, 2000, no. 11, pp. 52–53.
5. Burykin A.N. *Gosudarstvennoe regionalnoe upravlenie i formirovanie postoyannogo naseleniya Sakhalinskoj oblasti (istoriya i sovremennost): monografiya*. [State regional management and formation of the resident population of the Sakhalin region (history and modernity)]. Moscow, «Sputnik +» Publ., 2009. 244 p.
6. Burykin A.N. *Gumanizatsiya gosudarstvennogo regionalnogo upravleniya kak smysl i osnovnoe sodержanie strategii sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya Sakhalinskoj oblasti: monografiya*. [Humanization of the state regional administration as the meaning and main contents of the strategy of socio-economic development of the Sakhalin region]. Moscow, «Sputnik +» Publ., 2009. 444 p.
7. *Pervaya Vseobshchaya perepis naseleniya Rossiyskoj imperii 1897 g.* [The first General census of the Russian Empire in 1897. In 89 vol. Vol. 77. The Island of Sakhalin]. Ed. by N.A. Troinit-skny. St-Petersburg, Central Statistical Committee of the Ministry of the Interior, 1899. 16 p.
8. *Naselenie Rossii za 100 let (1897–1997): Statisticheskij sbornik* [The population of Russia for 100 years (1897–1997)] Ed. by A.Yu. Yurkova, V.L. Sokolin. Moscow, State Statistics Committee of Russia, 1998. 222 p.
9. *Administratsiya gubernatorstva Karafuto. Rezultaty perepisi 1925 goda: Domovladieniya i chislennost naseleniya* [The administration of the governorate of Karafuto. The results of the census of 1925: Households and population]. Toyohara, 1926. 30 p.
10. *Administratsiya gubernatorstva Karafuto. Rezultaty perepisi 1935 goda: Domovladieniya i chislennost naseleniya* [The administration of the governorate of Karafuto. The results of the census of 1935: Households and population]. Toyohara, 1936. 25 p.
11. *Predvaritelnye itogi Vserossiyskoj perepisi naseleniya 2010 goda* [Preliminary results of national population census 2010]. Moscow, «Statistics of Russia» Publ., 2011. 87 p.

12. Chislennost naseleniya Rossiyskoy Federatsii po munitsipalnym obrazovaniyam na 1 yanvarya 2017 g. (31 iyulya 2017) [The population of the Russian Federation for municipalities on January 1, 2017, (31 July 2017)]. Available at: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2017/bul_dr/mun_obr2017.rar (accessed 01 November 2017).
13. Belyanina Ya.P. The Landscapes of the South-Eastern part of Sakhalin island. *Bulletin of the Dagestan state pedagogical University. Natural and Exact sciences*, 2015, no. 3 (32), pp. 87–92. In Rus.
14. Belyanina Ya.P. Landscape-functional zoning of the territory of the nature monument «Busse Lagoon», Sakhalin island. *Bulletin of the Dagestan state pedagogical University. Natural and Exact sciences*, 2015, no. 1 (30), pp. 67–72. In Rus.
15. Zaurbekov Sh.Sh., Bratkov V.V., Bekmurzaeva L.R. Geoecological assessment of landscapes anthropogenic modifications of the Chechen Republic. *Bulletin of the Dagestan state pedagogical University. Natural and Exact sciences*, 2010, no. 1, pp. 86–91. In Rus.
16. Amarnath G., Babar S., Murthy M.S.R. Evaluating MODIS-vegetation continuous field products to assess tree cover change and forest fragmentation in India – a multi-scale satellite remote sensing approach. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2017, vol. 20, Iss. 2, pp. 157–168.
17. Hu T., Su Y., Xue B., Liu J., Zhao X., Fang J., Guo Q. Mapping Global Forest Aboveground Biomass with Spaceborne LiDAR, Optical Imagery, and Forest Inventory Data. *Remote Sensing*, 2016, vol. 8, Iss. 7, pp. 565.
18. Santoro M., Beaudoin A., Beer C., Cartus O., Fransson J., Hall R., Pathe C., Schmullius C., Schepaschenko D., Shvidenko A., Thurner M., Wegmüller U. Forest growing stock volume of the northern hemisphere: Spatially explicit estimates for 2010 derived from Envisat ASAR. *Remote Sensing of Environment*, 2015, vol. 168, pp. 316–334.
19. Sizov A.P. *Monitoring i okhrana gorodskikh zemel* [Monitoring and reservation of urban lands]. Moscow, MIIGAiK Publ., 2009. 264 c.
20. Sizov A.P. *Otsenka kachestva i monitoring zemel sverkhkrupnogo goroda (na primere Moskvy): monografiya* [Assessment of quality and monitoring of land of large city (on example of Moscow)]. Moscow, MIIGAiK Publ., 2012. 242 p.
21. Molingreau J.P. Global vegetation dynamics: satellite observation over Asia. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, vol. 7 (9), pp. 1121–1146.
22. Richards J.A. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Berlin, Springer-Verlag, 1993. 250 p.
23. Emery W.J., Thomas A.C., Collins M.J., Crawford W.R., MacKas D.L. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images. *Journal of Geophysical Research*, 1986, vol. 91, no. C11, pp. 12865–12878.
24. Gauslaa Y. Infrared and visible reflectance in different lichen species and its ecological significance. *Holarctic Ecology*, 1984, no. 7 (1), pp. 13–22.
25. Golubeva E.I., Kapitsa A.P., Kravtsova V.I., Krasnushkin A.V., Lure I.K., Malyshev V.B., Ris U.G., Tutubalina O.A. *Ekologiya Severa: Distantionnye metody izucheniya narushennykh ekosistem (na primere Kol'skogo poluostrova)*. Kollektivnaya monografiya [Ecology of the North: Remote methods of studying disturbed ecosystems (by the example of Kola Peninsula). Collective monograph]. Ed. by A.P. Kapitsa, U.G. Ris. Moscow, Nauchny mir Publ., 2003. 248 p.
26. Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Loupian E.A. Mapping of arable land in Russia using multi-year time series of MODIS data and the LAGMA classification technique. *Remote Sensing Letters*, 2016, vol. 7, Iss. 3, pp. 269–278.
27. Batjes N.H. Soil data resources for land suitability assessment and environmental protection in Central and Eastern Europe: the 1:2500000 scale SOVEUR project. *The Land*, 2001, no. 5, pp. 51–68.
28. Sinha S., Sharma L.K., Nathawat M.S. Improved land-use/land-cover classification of semi-arid deciduous forest landscape using thermal remote sensing. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2015, vol. 18, Iss. 2, pp. 217–233.
29. Neef E. *Die Stellung der Landschaftsökologie in der physischen Geographie* [The Stellung of the landscape ecology in the physical geography]. *Geographische Berichte*, 1962, V. 4, pp. 349–356. In Germ.
30. Neef E. *Die theoretischen Grundlagen der Landschaftlehre* [The theoretical foundations of the land-sheep teaching]. Leipzig, Gotha 1967. 152 p. In Germ.
31. Kachur A.N., Baklanov P.Ya. *Ekologo-geograficheskie problemy i ogranicheniya v regionalnom razviti. Geosistemy Dalnego Vostoka Rossii na rubezhe XX–XXI vekov: v 3-kh t. T. 3. Territorialnye sotsialno-ekonomicheskie struktury* [Ecological-geographical problems and constraints in regional development. Geosystems of the Russian Far East at the turn of XX–XXI centuries: in 3 vol. Vol. 3. Territorial socio-economic structures]. Eds. P.Ya. Baklanov, M.T. Romanov. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2012. pp. 111–118.
32. Karpik A.P., Avrunev E.I., Varlamov A.A. Improvement of quality control procedures for satellite positioning when creating geo-information space of territorial units. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*, 2014, no. S4, pp. 182–186. In Rus.
33. Atayev Z. V., Bratkov V. V. Modern Trends of Change of Residential Development of the Landscapes of Dagestan. *European Geographical Studies*, 2014, no. 1 (1), pp. 4–11.
34. Bratkov V.V., Atayev Z.V. The Current Trends in the Residential Development of Landscape and Geomorphological Tiers of the Republic of Dagestan. *European Researcher*, 2015, vol. 93, Iss. 4, pp. 282–289.
35. Bratkov V.V., Zaurbekov Sh.Sh., Klyushin V.P., Marin A.N. Remote sensing of the territory of the North Caucasus. *Land management, cadastre and monitoring of lands*, 2011, no. 4 (76), pp. 69–80. In Rus.
36. Lisitskiy D.V., Murzintsev P.P. Geodesy monitoring of territories. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*, 2012, no. 2/1, pp. 116–118. In Rus.
37. Dozier J. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. *Remote Sensing of Environment*, 1981, vol. 11, pp. 221–229.
38. Belorustseva E. V., Shapovalov D. A. Monitoring khozyaystvennogo ispol'zovaniya zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya nechernozem'ya [Monitoring of economic use of agricultural land of Nonblack Soil Zone]. *Problemy regional'noy ekologii*, 2016, no 1, pp. 116–122. In Rus.
39. Vershinin V.V., Murasheva A. A., Shirokova V. A., Khutorova A.O., Shapovalov D. A., Tarbaev V. A. The solutions of the agricultural land use monitoring problems. *International Journal of Environmental and Science Education*, 2016, vol. 11, no. 12, pp. 5058–5069.
40. Bondur V.G. Satellite Monitoring of Wildfires during the Anomalous Heat Wave of 2010 in Russia. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2011, vol. 47, no. 9, pp. 1039–1048.
41. Melkiy V.A., Verkhoturov A.A., Dolgoplov D.V., Burykin A.N., Ilin V.V., Gal'tsev A.A., Zaripov O.M., Novikov D.G., Belyanina Ya.P., Eremenko I.V. Environmental monitoring and activities to reduce potential negative impact of the pipelines (Project «Sakhalin-2») on the environment of Sakhalin island. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*, 2015, no. 4, pp. 101–108. In Rus.

Received: 15 December 2018.

Information about the authors

Vyacheslav A. Melkiy, Dr. Sc., director of the Oil and Gas Technical Institute, Sakhalin State University.

Alexey A. Verkhoturov, senior lecturer, Sakhalin State University.

Yana P. Popova, Cand. Sc., associate professor, Sakhalin State University.

Alexander N. Burykin, Cand. Sc., associate professor, Sakhalin State University.

УДК 546.824:664.162.036

ФОРМИРОВАНИЕ ЧАСТИЦ ДИОКСИДА ТИТАНА ПРИ ГИДРОЛИЗЕ И ТЕРМОГИДРОЛИЗЕ ВОДНО-СПИРТОВЫХ РАСТВОРОВ ТЕТРАХЛОРИДА ТИТАНА

Пойлов Владимир Зотович¹,
vladimirpoilov@mail.ru

Казанцев Александр Леонидович¹,
itilamid@rambler.ru

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

Актуальность. В технологии получения диоксида титана путем пламенного синтеза из горючих органико-минеральных сред на начальном этапе приготовления и распыления водно-спиртового раствора тетрахлорида титана при температурах до 100 °С протекает гидролиз тетрахлорида титана с образованием полупродуктов различного состава $Ti(OH)_xCl_{4-x}$. В дальнейшем при повышенных температурах в условиях малого времени пребывания в реакторе синтеза полупродукты гидролиза превращаются в диоксид титана. Характеристики получаемого диоксида титана зависят от условий протекания процессов гидролиза и термогидролиза тетрахлорида титана в растворе и в пламени. В связи с этим выявление возможности управления размерами частиц диоксида титана на стадиях гидролиза и высокотемпературного синтеза за счет регулирования состава растворов тетрахлорида титана в водно-спиртовых средах представляет научный и практический интерес.

Цель: изучение формирования частиц продуктов гидролиза тетрахлорида титана в водно-спиртовых растворах этанола, бутанола, изопропанола до стадии распыления при температурах до 100 °С и образования частиц диоксида титана в процессе термогидролиза при сгорании водно-спиртовых растворов в пламени при повышенных температурах более 780 °С.

Объекты: органико-минеральные растворы тетрахлорида титана и продукты их гидролиза, образующиеся при температурах до 100 °С и при сгорании водно-спиртовых растворов в пламени при температурах более 780 °С.

Методы: динамическое светорассеяние для анализа размеров продуктов гидролиза тетрахлорида титана в водно-спиртовых растворах этанола, бутанола, изопропанола; вибрационная вискозиметрия и метод Дю-Нуи для оценки динамической вязкости и поверхностного натяжения изучаемых растворов; оптическая микроскопия для определения размеров капель растворов; электронная микроскопия продуктов пламенного синтеза диоксида титана.

Результаты. Выявлено, что размер частиц продуктов гидролиза тетрахлорида титана в водно-спиртовых растворах зависит от природы спирта, а рост частиц происходит в три этапа: формирование первичных частиц → мицелл → агломератов. Экспериментально показано, что на стадии термогидролиза можно регулировать остаточное содержание хлора, форму и размер образующихся частиц диоксида титана посредством изменения состава исходного раствора и температуры. Применение бутилового и изопропилового спиртов способствует повышению температуры термогидролиза и образованию ультрадисперсных частиц.

Ключевые слова:

Гидролиз, термогидролиз, водно-спиртовые растворы, тетрахлорид титана, диоксид титана, ультра- и наночастицы, форма, размер, механизм формирования.

Введение

Важной задачей технологии диоксида титана является получение продуктов с заданными характеристиками (остаточное содержание хлора, размер и форма частиц и др.), которые в значительной степени зависят от условий формирования частиц. При получении диоксида титана (TiO_2) путем пламенного синтеза из горючих органико-минеральных сред на начальном этапе приготовления и распыления прекурсора (водно-спиртового раствора тетрахлорида титана) при температурах до 100 °С протекает гидролиз тетрахлорида титана ($TiCl_4$) с образованием полупродуктов различного состава $Ti(OH)_xCl_{4-x}$. На стадии термогидролиза при сгорании прекурсора в пламени при повышенных температурах 780–940 °С в условиях малого времени пребывания полупродукты гидролиза превращаются в диоксид титана. Таким образом, остаточное содержание хлора, форма и размеры частиц получаемого TiO_2 зависят от условий протекания процессов гидролиза и термогидролиза тетрахлорида титана в растворе и в пламени.

Закономерности гидролиза тетрахлорида титана в водной среде изучены в работах [1–6], в которых показано, что повышение температуры и pH ускоряет гидролиз, приводит к получению более крупных частиц диоксида титана. Введение в раствор тетрахлорида титана н-пропанола способствует увеличению размера получаемых частиц TiO_2 [2]. Причиной этого является снижение диэлектрической проницаемости и как следствие – уменьшение модуля дзета-потенциала первичных частиц продуктов гидролиза, что способствует агломерации частиц TiO_2 .

Сравнительно хорошо установлены закономерности получения диоксида титана путем термогидролиза паровой фазы, в котором $TiCl_4$ сначала испаряют, а затем подвергают гидролизу при повышенных температурах, создаваемых горением различных топлив (метан, водород, монооксид углерода, сжиженный нефтяной газ) [7–15].

Большое количество исследований посвящено изучению получения диоксида титана из алкоксидов титана методом пламенного распыления. В ра-

ботах [16–25] в качестве прекурсоров применяют буюксиды и пропоксиды титана, получаемые из $TiCl_4$, что заметно усложняет технологию, добавляя дополнительную стадию производства прекурсора.

Мало изученным остается процесс термогидролиза $TiCl_4$ в водно-спиртовых средах, протекающий при распылении и сгорании таких сред в пламени, что послужило причиной проведения настоящих исследований.

Экспериментальная часть

Объектами исследования являлись водно-спиртовые растворы $TiCl_4$, содержащие этанол, изопропанол и бутанол. Для их приготовления были использованы: раствор $TiCl_4$ с концентрацией основного вещества 2,2 моль/л, подкисленный соляной кислотой, раствор этилового спирта 95 %, изопропанол химической чистоты и бутанол химической чистоты. Составы растворов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Составы изучаемых водно-спиртовых растворов $TiCl_4$

Table 1. Composition of $TiCl_4$ aqueous-alcoholic solutions

№ раствора Solution no.	$TiCl_4$	H_2O	C_2H_5OH	C_3H_7OH	C_4H_9OH
	мас. %/wt. %				
1	11,84	23,53	64,63	0	0
2	11,94	19,44	0	68,62	0
3	8,09	13,17	0	0	78,74

Составы подобраны таким образом, чтобы процесс термогидролиза при распылении и сжигании шел автотермично. При этом концентрация $TiCl_4$ в растворе № 3 меньше, т. к. ее повышение приводит к образованию эмульсии, что делает невозможным определение размеров частиц методом динамического светорассеяния.

Гидролиз тетрахлорида титана в водно-спиртовых растворах этанола, изопропанола, бутанола изучали при температуре 70 °С в течение 50 минут в термостатируемой ячейке прибора «Zetasizer Nano ZS» фирмы «Malvern» с одновременным анализом размеров и динамики роста частиц продуктов гидролиза (через каждые 2 минуты) методом фотонной корреляционной спектроскопии.

Термогидролиз тетрахлорида титана при температурах выше 750 °С исследовали на установке, включающей систему регулируемой подачи газа и раствора, тонкого распыления раствора через форсунку с помощью компрессора в факел сгораемого прекурсора, реактор, в котором производится горение реакционной смеси, систему улавливания продуктов термогидролиза, приборы контроля и регулирования температуры, расхода сжатого воздуха и раствора, систему абсорбции кислых газов – побочных продуктов процесса. Органо-минеральные растворы с расходом 20 мл/мин подавали в форсунку, где происходило их распыление сжатым воздухом (0,2 МПа, 100 л/мин). Распыление раствора производили в объем цилиндрического

реактора, изготовленного из кварца. Длительность пребывания микрокапель в реакторе составляла 0,7–0,8 с. Воспламенение распыляемого раствора осуществляли за счет пламени водородной горелки, работающей в непрерывном режиме. Дисперсную фазу отделяли от газового потока на фильтре из термостойкой ткани.

Размер и форму полученных частиц диоксида титана определяли на сканирующем электронном микроскопе «S-3400N» фирмы «НИТАСН» с приставкой для рентгеноспектрального анализа фирмы «Брукер». Также проводили количественный рентгеноспектральный анализ образцов для определения их химического состава. Измерение динамической вязкости прекурсора тетрахлорида титана было проведено на синусоидальном вибровискозиметре «SV-10» фирмы «A&D». Для определения величины поверхностного натяжения растворов был использован тензиометр «K100С-МК2» фирмы «Kruss». Размеры капель были определены с помощью прибора «Lasentec V819» фирмы «Met-tler Toledo».

Обсуждение результатов

На рис. 1–3 показаны трехмерные диаграммы изменения гранулометрического состава гидролизующихся частиц от времени в различных органо-минеральных средах.

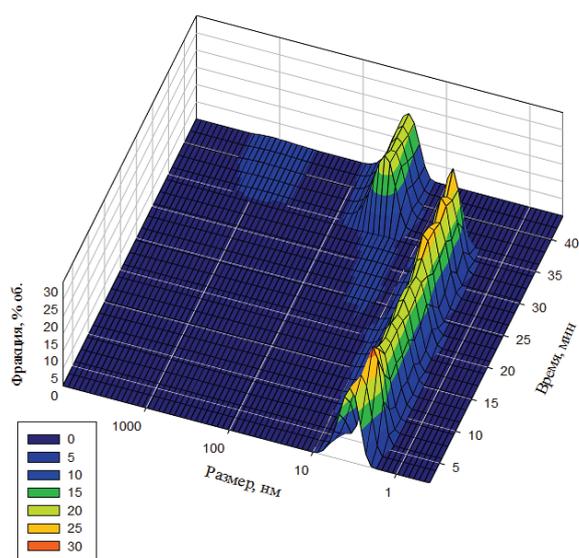


Рис. 1. Динамика изменения гранулометрического состава гидролизующихся частиц $TiCl_4$ в водном растворе этилового спирта

Fig. 1. Trends in granulometric composition of $TiCl_4$ particles hydrolyzing in water-ethanol solution

Из рис. 1 видно, что в растворе, содержащем этанол, с 0 до 35 минуты эксперимента присутствуют частицы размерами менее 10 нм. С 25 минуты начинают регистрироваться частицы размерами от 10 до 100 нм, при этом их объемная концентрация составляет менее 5 %. На 35 минуте концентрация мицелл резко возрастает, одновременно с этим на-

чинают регистрироваться частицы размерами от 800 нм с концентрацией менее 5 % об.

Из рис. 2, 3 видно, что первичные частицы продуктов гидролиза малого размера присутствуют с начала проведения эксперимента (как и в растворе с этиловым спиртом, рис. 1). На 8-й минуте в обоих случаях происходит быстрая агломерация первичных частиц до размеров более 800 нм.

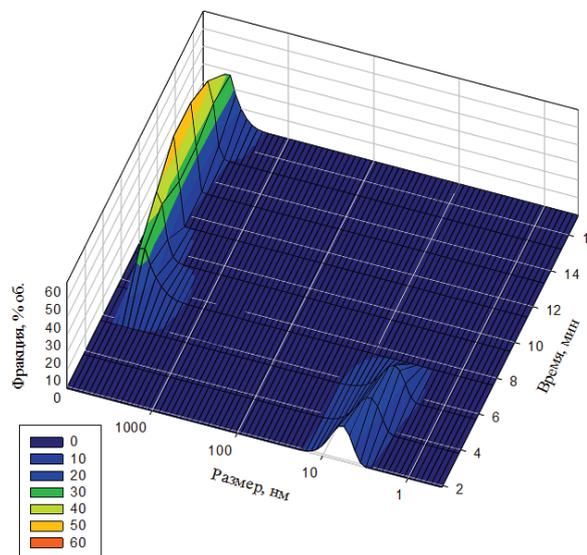


Рис. 2. Динамика изменения гранулометрического состава гидролизующихся частиц $TiCl_4$ в водном растворе изопропилового спирта

Fig. 2. Trends in granulometric composition of $TiCl_4$ particles hydrolyzing in water-isopropanol solution

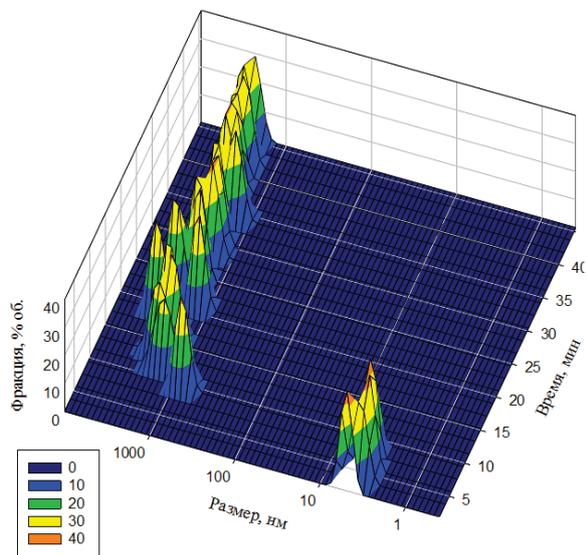


Рис. 3. Динамика изменения гранулометрического состава гидролизующихся частиц $TiCl_4$ в водном растворе бутилового спирта

Fig. 3. Trends in granulometric composition of $TiCl_4$ particles hydrolyzing in water-butanol solution

Исходя из координационной теории механизма протекания гидролиза тетрахлорида титана, сле-

дует, что наряду с процессом гидролиза протекает также процесс гидролитической полимеризации [26], который приводит к образованию полиядерных комплексов с большим количеством атомов титана, размеры таких полиядерных комплексов могут быть от 3 до 10 нм. В дальнейшем комплексы разрастаются, образуя положительно заряженные мицеллы с характеристическими размерами около $90 \times 45 \times 25$ нм, в которых цепочки соединены между собой [27]. Далее мицеллы могут образовывать агрегаты размером от 200 до 2000 нм, а из агрегатов могут образовываться субагрегаты с размером более 5000 нм.

Таким образом, последовательность образования и роста частиц при гидролизе тетрахлорида титана можно разделить на три этапа, протекающих последовательно. *Первый этап* – образование первичных частиц с размерами 4–8 нм в течение 2-х минут с периодом стабилизации размеров, в течение которого наблюдается рост количества частиц без изменения размеров в течение 6-ти минут (в присутствии изопропилового спирта), 8-ми минут (в присутствии бутанола) и 34-х минут (в присутствии этанола). Большая длительность стабилизации размеров частиц для системы, содержащей этиловый спирт, связана с тем, что этиловый спирт с водой может образовывать гидраты, тем самым замедляя реакцию гидролиза тетрахлорида титана. Кроме того, этиловый спирт имеет более высокую диэлектрическую проницаемость (24,3) по сравнению с изопропиловым (18,3) и бутиловым спиртами (17,1), что повышает заряды частиц продуктов гидролиза тетрахлорида титана и препятствует их агрегации [28]. *Второй этап* – резкий рост размеров частиц (с 4–8 нм до 45 нм в среде этилового спирта) и до 3–8 тысяч нм в среде изопропанола и бутанола, соответственно. *Третий этап* – стабилизация размеров образовавшихся агрегатов.

Из анализа полученных данных следует, что при использовании свежеприготовленных водно-спиртовых прекурсоров тетрахлорида титана при малом времени выдержки независимо от природы спирта гидролиз тетрахлорида титана сопровождается формированием частиц с размерами до 8 нм. При увеличении длительности выдержки водно-спиртовых прекурсоров до 8 минут размеры частиц продуктов гидролиза существенно возрастают в присутствии изопропанола и бутанола, в то время как этанол снижает скорость реакции гидролиза и, следовательно, образование мицелл.

Для изучения процесса термогидролиза при распылении и сжигании органо-минеральных сред (табл. 1) при температурах выше $780^\circ C$ были определены размеры капель создаваемого аэрозоля, а также показатели динамической вязкости и поверхностного натяжения жидкой фазы (табл. 2).

Из данных табл. 2 видно, что размеры капель получаемых аэрозолей одинаковы для растворов № 2, 3, содержащих изопропанол и бутанол соответственно, и меньше для раствора № 1, содержащего этанол. Меньший размер капель для раствора, содержа-

Таблица 2. Характеристики жидкой фазы аэрозоля, температура в реакторе и содержание хлора в порошках TiO_2
Table 2. Characteristics of aerosol liquid medium, temperature in the reactor and the percentage of chlorine in TiO_2 powder

№	Средний размер капле Average size of drops, мкм (μm)	Динамическая вязкость, мПа*с Dynamic viscosity, mPa*s	Поверхностное натяжение, мН/м Surface tension, mN/m	Температура в реакторе Temperature in the reactor, °C	Содержание иона хлора в порошках TiO_2 , мас. % Chlorine ion content in TiO_2 powders, wt. %
1 (раствор с этанолом solution with ethanol)	36,76	0,92	26,94	780,00	0,17
2 (раствор с изопропаолом solution with isopropanol)	42,23	1,99	24,57	800,00	0,1
3 (раствор с бутанолом solution with butanol)	42,61	2,59	25,16	940,00	0,1

щего этанол, объясняется значительно меньшей величиной вязкости (более чем в 2 раза) при близких значениях величин поверхностного натяжения.

При проведении процесса термогидролиза в автотермическом режиме без подвода тепла температура в реакторе обеспечивалась только за счет тепла, выделяющегося при сгорании спирта. Закономерно, что с ростом содержания спиртов, а также их теплотворной способности в ряду: этанол (29,77 кДж/г), изобутанол (33,13 кДж/г), пропанол (36,07 кДж/г) и уменьшением содержания воды (табл. 1) в прекурсор температура в реакторе возрастает от 780 до 940 °C (табл. 2). Повышение температуры в реакторе позволяет добиться большей полноты протекания процесса термогидролиза тетраоксида титана, снизить остаточное содержание хлора в диоксиде титана.

На рис. 4–6 показаны частицы порошков TiO_2 , полученных при $T=780-940$ °C из растворов № 1–3.

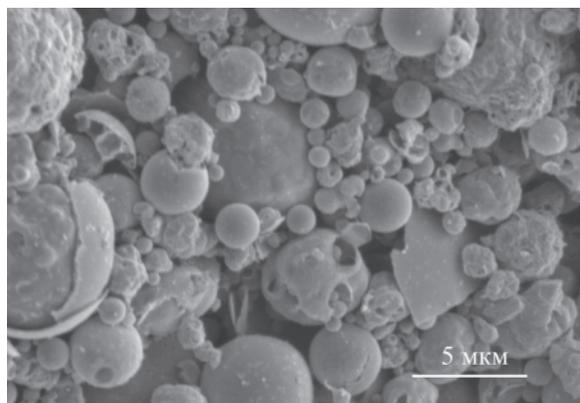


Рис. 4. Микрофотография частиц TiO_2 , полученных при $T=780$ °C из раствора № 1 (увеличение 5000 \times)

Fig. 4. Micrograph of TiO_2 particles obtained with $T=780$ °C from solution no. 1 (magnification 5000 \times)

Как видно из рис. 4, частицы TiO_2 , полученные из раствора № 1, имеют полидисперсный состав, являются самыми крупными (0,5–5,0 мкм), несмотря на то, что размеры капель аэрозоля этого раствора были минимальными (36,76 мкм). За счет испарения жидкой фазы (воды и спирта) и термогидролиза размеры капель уменьшаются до размеров шаровидных частиц в 7,3–184 раза. Крупные частицы имеют отверстия, что говорит о выделе-

нии из них, при синтезе, паров воды и хлористого водорода. Мелкие частицы TiO_2 имеют шаровидную форму. Частицы TiO_2 , полученные из растворов № 2, 3 (рис. 4, 5), имеют более однородный дисперсный состав с размерами 0,25–1,30 и 0,20–1,40 мкм, соответственно. С увеличением температуры процесса размер частиц снижается, в продукте возрастает число частиц осколочной формы, что указывает на более полное термическое разрушение продуктов термогидролиза.

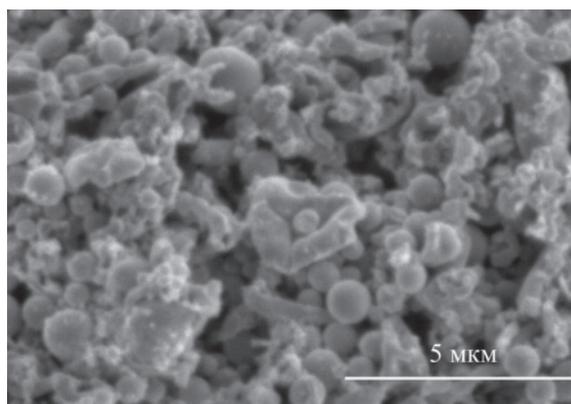


Рис. 5. Микрофотография частиц TiO_2 , полученных при $T=800$ °C из раствора № 2 (увеличение 10000 \times)

Fig. 5. Micrograph of TiO_2 particles obtained with $T=800$ °C from solution no. 2 (magnification 10000 \times)

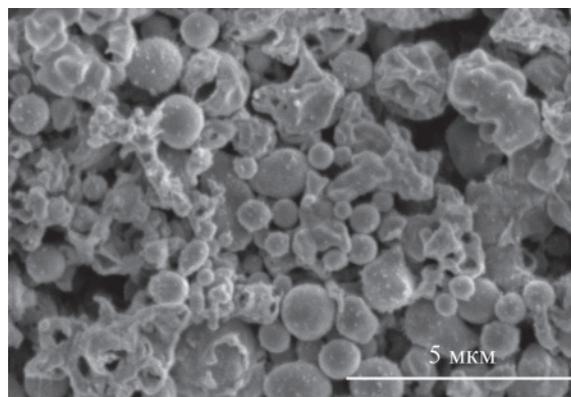


Рис. 6. Микрофотография частиц TiO_2 , полученных при $T=940$ °C из раствора № 3 (увеличение 10000 \times)

Fig. 6. Micrograph of TiO_2 particles obtained with $T=940$ °C from solution no. 3 (magnification 10000 \times)

Таким образом, при термогидролизе спиртовых растворов $TiCl_4$ в пламени в области температур 780–940 °С формируются преимущественно шаровидные частицы с размерами, меньше размера распыляемых капель прекурсора в 30–211 раз. При этом на размер частиц продукта термогидролиза доминирующее влияние оказывает температура процесса, и в меньшей степени – размер распыляемых капель прекурсора.

Выводы

1. В процессе синтеза ультра- и нанодисперсных частиц диоксида титана из водно-спиртовых растворов тетрахлорида титана путем распыления при температурах до 100 °С и сжигания растворов при температурах выше 780 °С происходит сначала гидролиз $TiCl_4$ с образованием промежуточных продуктов $Ti(OH)_xCl_y$, а затем термогидролиз с формированием частиц диоксида титана. Выявлено, что гидролиз в растворе тетрахлорида титана в значительной степени зависит от природы спирта, а рост частиц продуктов гидролиза происходит поэтапно: образование первичных частиц → образование микелл → образование агломератов.

2. Экспериментально доказано, что на стадии термогидролиза спиртовых растворов тетрахлорида титана при температурах 780–940 °С в условиях малого времени пребывания капель прекурсоров в реакторе доминирующее влияние на размеры и форму частиц диоксида титана оказывает температура в реакторе, величина которой зависит от природы и содержания спирта в распыляемом прекурсоре.

3. Введение в раствор тетрахлорида титана этилового спирта, имеющего невысокую теплопроводную способность, способствует формированию крупных агрегированных частиц TiO_2 с повышенным содержанием хлорид-иона. Повышение температуры термогидролиза за счет введения в прекурсор большего количества бутанола, имеющего более высокую теплопроводную способность, приводит к получению частиц TiO_2 с низким содержанием остаточного хлора с минимальным размером частиц.

4. С увеличением температуры процесса термогидролиза спиртовых растворов тетрахлорида титана размер частиц TiO_2 снижается, в продукте возрастает число частиц осколочной формы, что указывает на более полное термическое разрушение продуктов термогидролиза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синтез и стабилизация наноразмерного диоксида титана / З.Р. Исмагилов, Л.Т. Цицова, Н.В. Шикина, В.Ф. Зарытова, В.В. Зиновьев, С.Н. Загребельный // Успехи химии. – 2009. – Т. 78. – № 9. – С. 942–955.
2. Chia-Szu Fang, Yu-Wen Chen. Preparation of titania particles by thermal hydrolysis of $TiCl_4$ in n-propanol solution // Materials Chemistry and Physics. – 2003. – V. 78. – P. 739–745.
3. Titanium Oxide Nanoparticles Precipitated from Low-Temperature Aqueous Solutions: I. Nucleation, Growth, and Aggregation / Guangneng Zhang, K.R. Biplab, F.A. Lawrence, Junghyun Cho // Journal of the American Ceramic Society. – 2008. – V. 91. – P. 3875–3882.
4. Xu J.H. et al. Novel core-shell structured mesoporous titania microspheres: preparation, characterization and excellent photocatalytic activity in phenol abatement // Journal of Photochemistry and Photobiology. A: Chemistry. – 2008. – № 195. – P. 284–294.
5. Xie H. et al. Thermal analysis on nanosized TiO_2 prepared by hydrolysis // Thermochimica acta. – 2002. – № 381. – P. 45–48.
6. Мазанов С.В., Амирханов Р.Д. Влияние воды на рост частиц диоксида титана, получаемых золь-гель методом // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 10. – С. 76–78.
7. Effect of reaction temperature on CVD-made TiO_2 primary particle diameter / K. Nakaso, K. Okuyama, M. Shimada, E.S. Pratsinis // Chemical Engineering Science. – 2003. – № 58. – P. 3327–3335.
8. Windeler R.S., Friedlander S.K., Lehtinen K.E. Production of Nanometer-Sized Metal Oxide Particles by Gas Phase Reaction in a Free Jet. I: Experimental System and Results // Aerosol Science and Technology. – 1997. – № 17. – P. 174–190.
9. Low temperature vapor-phase preparation of TiO_2 nanopowders / B. Xia, W. Li, B. Zhang, Y. Xie // Journal of Material Science. – 1999. – № 34. – P. 3505–3511.
10. Tsantilis S. et al. Population balance modeling of flame synthesis of titania nanoparticles // Chemical Engineering Science. – 2002. – № 57. – P. 2139–2156.

11. Pratsinis S.E., Zhu W., Vemury S. The role of gas mixing in flame synthesis of titania powders // Powder Technology. – 1996. – № 86. – P. 87–93.
12. Hung C.-H., Katz J. L. Formation of mixed oxide powders in flames: P. I // Journal of Materials Research and Technology. – 1992. – № 7. – P. 1861–1869.
13. George A.P., Murley R.D., Place E.R. Formation of TiO_2 aerosol from the combustion supported reaction of $TiCl_4$ and O_2 // Faraday Symposia of the Chemical Society. – 1973. – № 7. – P. 63–71.
14. Bhanwala A.K. et al. Flame aerosol synthesis and characterization of pure and carbon coated titania nano powder // Journal of Aerosol Science. – 2009. – № 40. – P. 720–730.
15. Fotou G.P., Vemury S., Pratsinis S.E. Synthesis and evaluation of titania powders for photodestruction of phenol // Chemical Engineering Science. – 1994. – № 49. – P. 4939–4948.
16. Hu Y. Engineering the outermost layers of TiO_2 nanoparticles using in situ Mg doping in a flame aerosol reactor // AIChE Journal. – 2017. – V. 63. – № 3. – P. 870–880.
17. Liu P. et al. Aerosol Science and Technology Synthesis of Titanium Dioxide Aerosol Gels in a Buoyancy-Opposed Flame Reactor // Aerosol Science and Technology. – 2015. – V. 49. – № 12. – P. 1232–1241.
18. Zhao H., Liu X., Stephen D.T. Effects of pressure and precursor loading in the flame synthesis of titania nanoparticles // Aerosol Science and Technology. – 2009. – № 40. – P. 919–937.
19. Wang J. et al. Synthesis of TiO_2 nanoparticles by premixed stagnation swirl flames // Proceedings of the Combustion Institute. – 2011. – № 33. – P. 1925–1932.
20. Yeh C.L., Yeh S.H., Ma H.K. Flame synthesis of titania particles from titanium tetraisopropoxide in premixed flames // Powder Technology. – 2004. – № 145. – P. 1–9.
21. McCormick J.R. et al. Thermal stability of flame synthesized Anatase TiO_2 nanoparticles // Journal of Physical Chemistry A. – 2004. – B. 108. – P. 17398–17402.
22. Akurati K.K. et al. Synthesis of non-aggregated titania nanoparticles in atmospheric pressure diffusion flames // Powder Technology. – 2006. – № 165. – P. 73–82.

23. Dozzi M.V. et al. Photocatalytic activity of one step flame-made fluorine doped TiO₂ // *Applied Catalysis A: General*. – 2016. – V. 521. – P. 220–226.
24. Swapna Challagulla, Sounak Roy. The role of fuel to oxidizer ratio in solution combustion synthesis of TiO₂ and its influence on photocatalysis // *Journal of Materials Research*. – 2017. – V. 32. – № 14. – P. 2764–2772.
25. Lavric V. et al. A new model for nano-TiO₂ crystals birth and growth in hydrothermal treatment using oriented attachment approach // *Crystal Growth & Design*. – 2017. – V. 17. – № 11. – P. 5640–5651.
26. Беленький Е.Ф., Рискин И.В. Химия и технология пигментов. 3-е изд. – Л.: Госхимиздат, 1960. – 757 с.
27. Большаков К.А. Химия и технология редких и рассеянных элементов. 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1976. – 360 с.
28. Hong Kyu Park, Do Kyung Kim, Chong Hee Kim. Effect of Solvent on Titania Particle Formation and Morphology in Thermal Hydrolysis of TiCl₄ // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1997. – V. 80. – P. 743–749.

Поступила 19.01.2018 г.

Информация об авторах

Пойлов В.З., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Казанцев А.Л., инженер-исследователь кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 546.824:664.162.036

TiO₂ PARTICLES FORMATION DURING HYDROLYSIS AND THERMOHYDROLYSIS OF TiCl₄ AQUEOUS-ALCOHOLIC SOLUTIONS

Vladimir Z. Poylov¹,
vladimirpoylov@mail.ru

Aleksandr L. Kazantsev¹,
itilamid@rambler.ru

¹ Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolsky Avenue, Perm, 614990, Russia.

The relevance. Titanium dioxide is obtained by flaming synthesis from organo-oil mediums technology. At the initial stage of that technology during TiCl₄ aqueous-alcoholic solution preparing and dispersion at 100 °C or less TiCl₄ hydrolysis is occurred with intermediate products formation Ti(OH)_xCl_{4-x}, having variable composition. Hereinafter at higher temperatures and smaller residence time in synthesis reactor the intermediate products of hydrolysis are transformed in titanium dioxide. TiO₂ characteristics depend on conditions of TiCl₄ hydrolysis and thermohydrolysis implementation in solution and flame. In this regard determination of possibility of controlling TiO₂ particle sizes at hydrolysis and high temperature synthesis owing to regulating TiCl₄ structure in aqueous-alcoholic mediums is of great scientific and practical interest.

The main aim is to study the formation of titanium tetrachloride hydrolysis product particles in aqueous-alcoholic solutions of ethanol, isopropanol and butanol to the sputtering stage at temperature up to 100 °C and titanium dioxide particles in thermohydrolysis at combustion of aqueous-alcoholic solutions at temperature higher than 780 °C.

Objects: organo-mineral solutions of titanium tetrachloride and products of their hydrolysis, formed at temperatures up to 100 °C and at combustion of water-alcohol solutions in a flame at temperatures above 780 °C.

Methods: dynamic light dispersion for analyzing the sizes of TiCl₄ hydrolysis products in aqueous-alcoholic solution of ethanol, butanol, isopropanol; oscillatory viscometry and the Du-Nuits method for estimating dynamic viscosity and surface tension of the studied solutions; optical microscopy for measuring solution drop sizes; electron microscopy of TiO₂ flaming synthesis products.

Results. The study identified that titanium tetrachloride hydrolysis products particles size depends on alcohol nature and particle grow in three stages: initial particle formation → micelles formation → agglomerates. It is experimentally possible to regulate residual chlorine, the shape and size of generated titanium dioxide particles through regulating the precursor composition and temperature at the thermohydrolysis stage. The usage of isopropanol and butanol contributes to thermohydrolysis temperature growth and to ultrafine particle formation.

Key words:

Hydrolysis, thermohydrolysis, aqueous-alcoholic solutions, titanium tetrachloride, titanium dioxide, ultrafine particles and nanoparticles, shape, size, formation mechanism.

REFERENCES

- Ismagilov Z.R., Tsikoza L.T., Shikina N.V., Zarytova V.F., Zinov V.V., Zagrebnyi S.N. Synthesis and stabilization of nanosized titanium dioxide. *Russ. chem. rev.*, 2009, vol. 78, no. 9, pp. 873–885. In Rus.
- Chia-Szu Fang, Yu-Wen Chen. Preparation of titania particles by thermal hydrolysis of TiCl₄ in n-propanol solution. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, vol. 78, pp. 739–745.
- Guangneng Zhang, Biplab K.R., Lawrence F.A., Junghyun Cho. Titanium Oxide Nanoparticles Precipitated from Low-Temperature Aqueous Solutions: I. Nucleation, Growth, and Aggregation. *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, vol. 91, pp. 3875–3882.
- Xu J.H. Novel core-shell structured mesoporous titania microspheres: Preparation, characterization and excellent photocatalytic activity in phenol abatement. *Journal of Photochemistry and Photobiology. A: Chemistry*, 2008, no. 195, pp. 284–294.
- Xie H. Thermal analysis on nanosized TiO₂ prepared by hydrolysis. *Thermochimica acta*, 2002, no. 381, pp. 45–48.
- Mazanov S.V., Amirkhanov R.D. The water influence on the growth of titanium dioxide particles obtained with sol-gel method. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2015. vol. 18, no. 10, pp. 76–78. In Rus.
- Nakaso K., Okuyama K., Shimada M., Pratsinis E.S. Effect of reaction temperature on CVD-made TiO₂ primary particle diameter. *Chemical Engineering Science*, 2003, no. 58, pp. 3327–3335.
- Windeler R.S., Friedlander S.K., Lehtinen K.E. Production of Nanometer-Sized Metal Oxide Particles by Gas Phase Reaction in a Free Jet. I: Experimental System and Results. *Aerosol Science and Technology*, 1997, no. 17, pp. 174–190.
- Xia B., Li W., Zhang B., Xie Y. Low temperature vapor-phase preparation of TiO₂ nanopowders. *Journal of Material Science*, 1999, no. 34, pp. 3505–3511.
- Tsantilis S. Population balance modeling of flame synthesis of titania nanoparticles. *Chemical Engineering Science*, 2002, no. 57, pp. 2139–2156.
- Pratsinis S.E., Zhu W., Vemury S. The role of gas mixing in flame synthesis of titania powders. *Powder Technology*, 1996, no. 86, pp. 87–93.
- Hung C.-H., Katz J. L. Formation of mixed oxide powders in flames: P. I. *Journal of Materials Research and Technology*, 1992, no. 7, pp. 1861–1869.
- George A.P., Murley R.D., Place E.R. Formation of TiO₂ aerosol from the combustion supported reaction of TiCl₄ and O₂. *Faraday Symposia of the Chemical Society*, 1973, no. 7, pp. 63–71.
- Bhanwala A.K. Flame aerosol synthesis and characterization of pure and carbon coated titania nano powder. *Journal of Aerosol Science*, 2009, no. 40, pp. 720–730.
- Fotou G.P., Vemury S., Pratsinis S. E. Synthesis and evaluation of titania powders for photodestruction of phenol. *Chemical Engineering Science*, 1994, no. 49, pp. 4939–4948.
- Hu Y. Engineering the outermost layers of TiO₂ nanoparticles using in situ Mg doping in a flame aerosol reactor. *AIChE Journal*, 2017, vol. 63, no. 3, pp. 870–880.

17. Liu P. Aerosol Science and Technology Synthesis of Titanium Dioxide Aerosol Gels in a Buoyancy-Opposed Flame Reactor. *Aerosol Science and Technology*, 2015, vol. 49, no. 12, pp. 1232–1241.
18. Zhao H., Liu X., Stephen D.T. Effects of pressure and precursor loading in the flame synthesis of titania nanoparticles. *Aerosol Science and Technology*, 2009, no. 40, pp. 919–937.
19. Wang J. Synthesis of TiO₂ nanoparticles by premixed stagnation swirl flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, no. 33, pp. 1925–1932.
20. Yeh C.L., Yeh S.H., Ma H.K. Flame synthesis of titania particles from titanium tetraisopropoxide in premixed flames. *Powder Technology*, 2004, no. 145, pp. 1–9.
21. McCormick J.R. Thermal stability of flamesynthesized anatase TiO₂ nanoparticles. *Journal of Physical Chemistry A.*, 2004, B. 108, pp. 17398–17402.
22. Akurati K.K. Synthesis of non-aggregated titania nanoparticles in atmospheric pressure diffusion flames. *Powder Technology*, 2006, no. 165, pp. 73–82.
23. Dozzi M.V. Photocatalytic activity of one step flame-made fluorine doped TiO₂. *Applied Catalysis A: General*, 2016, vol. 521, pp. 220–226.
24. Swapna Challagulla, Sounak Roy. The role of fuel to oxidizer ratio in solution combustion synthesis of TiO₂ and its influence on photocatalysis. *Journal of Materials Research*, 2017, vol. 32, no. 14, pp. 2764–2772.
25. Lavric V. A new model for nano-TiO₂ crystals birth and growth in hydrothermal treatment using oriented attachment approach. *Crystal Growth & Design*, 2017, vol. 17, no. 11, pp. 5640–5651.
26. Belenkii E.F., Riskin I.V. *Khimiia i tekhnologiia pigmentov* [Chemistry and technology of pigments]. Leningrad, Goskhimizdat Publ., 1960. 757 p.
27. Bolshakov K.A. *Khimiia i tekhnologiia redkikh i rasseyannykh elementov* [Chemistry and technology of rare and trace elements]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1976. 360 p.
28. Hong Kyu Park, Do Kyung Kim, Chong Hee Kim. Effect of Solvent on Titania Particle Formation and Morphology in Thermal Hydrolysis of TiCl₄. *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 80, pp. 743–749.

Received: 19 January 2018.

Information about the authors

Vladimir Z. Poylov, Dr. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

Aleksandr L. Kazantsev, research-engineer, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 621.671.22

ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ СЕКЦИОННОГО ТИПА НА КИМБЕРЛИТОВЫХ РУДНИКАХ АК «АЛРОСА» И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Овчинников Николай Петрович,
ovchinnlar1986@mail.ru

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
Россия, 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58.

Актуальность. Российская Федерация является одним из мировых лидеров по добыче алмазов. В настоящее время преобладающая часть (порядка 95 %) всех российских алмазов добывается на рудных (кимберлитовых) и россыпных месторождениях, расположенных на территории Якутии. Практика показывает, что подземная разработка кимберлитовых месторождений на территории Западной Якутии сопряжена с обильным поступлением шахтной воды в горные выработки. Без применения достаточного количества насосного оборудования проникающие в горные выработки шахтные воды делают процесс добычи алмазосодержащих руд более сложным и в первую очередь небезопасным для рабочего персонала. В настоящее время с целью борьбы с шахтными водопритоками на кимберлитовых рудниках используются электронасосные агрегаты секционного типа. Так как шахтный водоотлив является неотъемлемым технологическим процессом при добыче алмазосодержащего сырья, повышение надежности относящегося к нему оборудования является актуальной научно-практической задачей.

Объекты: электронасосные агрегаты секционного типа кимберлитовых рудников «Мир», «Удачный», «Интернациональный» и «Айхал».

Цель: изучение влияния различных производственных факторов, главным образом гидрогеологических условий, на показатели долговечности насосного оборудования водоотливных хозяйств кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА».

Методы. Для достижения поставленной цели использовался комплексный подход, включающий: анализ физико-химического состава шахтных вод, анализ значительного практического материала по работе насосного оборудования, а также ранее опубликованных работ по тематике исследования, натурные исследования электронасосных агрегатов секционного типа кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА».

Результаты. По результатам проведенных научных исследований были предложены рекомендации по повышению надежности насосного оборудования водоотливных установок кимберлитовых рудников, находящихся в ведении компании «АЛРОСА».

Ключевые слова:

Рудник, электронасосные агрегаты, водоотлив, плотность, коррозия, рабочее колесо, гидроабразивный износ.

Введение

Как известно, подземная разработка рудных месторождений, в том числе и кимберлитовых руд, сопровождается обильным поступлением шахтной воды в горные выработки рудников.

Поступающие водопритоки в горные выработки кимберлитовых рудников, эксплуатируемых алмазодобывающей компанией АК «АЛРОСА» на территории Западной Якутии, являются высоконцентрированными растворами различных солей с минерализацией 120...340 г/л, главным образом хлоридно-кальциевого и хлоридно-натриевого состава, отличительной особенностью которых является способность находиться в жидкообразном агрегатном состоянии при температуре окружающего воздуха до -50°C [1–4].

Активное состояние этих крепких рассолов практически при любой температуре окружающего воздуха приводит к интенсивному растворению солевых пород открытых и подземных выработок, что в конечном итоге ведет к росту трещиноватости и увеличению концентрации напряжений в массиве горных пород.

Одними из сопутствующих признаков данных геодинамических процессов являются локальные водопроявления в горных выработках (рис. 1, 2).

Эти локальные водопроявления могут значительно повлиять на общий водоприток, поступающий в кимберлитовые рудники Западной Якутии. К примеру, фактический объем крепких рассолов,

поступающих в кимберлитовый рудник «Мир», по истечении некоторого промежутка времени превышал проектный приблизительно в три раза ($\sim 750 \text{ м}^3/\text{ч}$ против $\sim 240 \text{ м}^3/\text{ч}$).



Рис. 1. Водопроявления в выработках кимберлитового рудника «Удачный»

Fig. 1. Water in workings of kimberlite mine «Udachny»



Рис. 2. Водопроявления на бортах кимберлитового карьера «Мир»

Fig. 2. Water on the sides of kimberlite pit «Mir»

Значительное увеличение объема поступающих в рудник «Мир» крепких рассолов повлекло за собой дополнительную нагрузку на водоотливные комплексы, что в конечном итоге стало одной из причин затопления рудника.

В связи с тем, что увеличения водопритока в перспективе следует ожидать и в других кимберлитовых рудниках АК «АЛРОСА», в частности на рудниках «Удачный», расположенном в районе Далдыно-Мархинского криогидрогеологического резервуара, повышение надежности электронасосных агрегатов секционного типа, являющихся наиболее распространенным видом насосного оборудования на указанных рудниках, является востребованной научно-практической задачей.

Решение поставленной задачи позволит повысить уровень промышленной безопасности при ведении горных работ на кимберлитовых рудниках АК «АЛРОСА» в случае незапланированного роста водопритока в их горные выработки.

Объект и методы исследования

Объектами исследования выступили электронасосные агрегаты секционного типа (далее – электронасосные агрегаты) кимберлитовых рудников «Мир», «Удачный», «Интернациональный» и «Айхал».

Цель работы – изучение влияния различных производственных факторов, главным образом гидрогеологических условий, на показатели долговечности насосного оборудования водоотливных хозяйств кимберлитовых рудников.

Для достижения поставленной цели использовался комплексный подход, включающий: анализ физико-химического состава шахтных вод, анализ значительного практического материала по работе насосного оборудования, а также ранее опубликованных работ по тематике исследования, натурные исследования электронасосных агрегатов секционного типа четырех кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА».

Результаты исследования

Откачиваемые из горных выработок кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА» крепкие рассолы в отличие чистой воды обладают большей плотностью (до 1300...1400 кг/м³), что согласно проведенным исследованиям крайне отрицательно влияет на электродвигатели насосного оборудования [5].

Как видно из выражения (1), при откачке как рассолов, так и чистой воды электронасосный агрегат будет выдавать идентичные гидравлические параметры – подачу и напор, но при разных значениях потребляемой мощности. Другими словами, электродвигатель электронасосного агрегата при работе на рассолах по сравнению с его работой на чистой воде будет потреблять большее количество электроэнергии, что в ряде случаев может привести к его перегреву, а соответственно с течением некоторого периода времени и к отказу.

$$P_p \Rightarrow P_q \frac{\rho_p}{\rho_q} \Rightarrow Q_q H_q g \rho_q \frac{\rho_p}{\rho_q} \Rightarrow Q_q H_q g \rho_p, \quad (1)$$

где P_q , Q_q , H_q , ρ_q – теоретическая мощность, теоретическая подача, теоретический напор электронасосного агрегата при работе на чистой воде и плотность чистой воды; P_p , ρ_p – теоретическая мощность электронасосного агрегата при работе на рассолах и плотность рассолов; g – ускорение свободного падения.

Для борьбы с этим негативным явлением обычно используется насосное оборудование с избыточным напором (так как рост напора электронасосного агрегата сопряжен с ростом его потребляемой мощности). Учитывая плотность крепких рассолов, а также их агрессивность к металлу, была выдвинута гипотеза, что для создания оптимальных условий для электродвигателей электронасосных агрегатов кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА» их номинальный напор H должен превосходить фактический полный напор h в 1,5...1,7 раза.

Как видно из кривой рис. 3, насосное оборудование в преобладающей доле случаев подобрано нерационально. Оказалось, что только насосное оборудование водоотливной установки ВНС-163 кимберлитового рудника «Айхал» используется эффективно ($H/h=1,51$ – для насосного оборудования модели ЦНСКА 300–480 и $H/h=1,545$ – для насосного оборудования модели ЦНСКА 105–490).

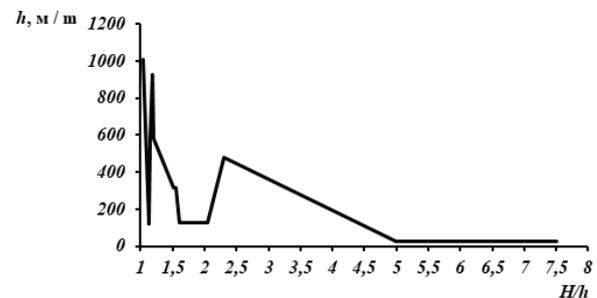


Рис. 3. Зависимость между h и H/h

Fig. 3. Dependence between h and H/h

Наиболее тяжелые условия работы для электродвигателей насосного оборудования кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА» отмечаются в случаях, когда $h > 600$ м. Для снижения риска отказов электродвигателей при $h > 600$ м рекомендуется либо их заменить на более энергоемкие модели, либо в перспективе использовать более высоконапорное насосное оборудование. Работа насосного оборудования остальных водоотливных установок кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА» связана с повышенными затратами на электроэнергию. Для снижения непроизводительных затрат на электроэнергию этого насосного оборудования предлагается снизить его избыточный напор до оптимального уровня путем демонтажа лишних ступеней.

Крепкие рассолы являются химически активными средами не только к горному массиву и за-

кладочному материалу, но и к металлу, что объясняется наличием в их составе значительного содержания различных растворенных солей и газов, в частности сероводорода.

Практика показала, что присутствующий в незначительном количестве сероводород в рассолах (2 мг/л), откачиваемых с горизонта «-210 м» кимберлитового рудника «Мир», привел к обширному коррозионному износу уплотнительных колец, выполненных из стали марки 20X13, через 1814 мото-ч работы насосного оборудования модели НЦС (К) 440–660 (рис. 4) [5]. После произошедшего инцидента руководством рудника было принято решение заменить сталь марки 20X13 на более коррозионностойкую сталь марки 12X18Н10Т. В свою очередь, как оказалось, что сталь марки 12X18Н10Т также имеет серьезный недостаток, под которым следует понимать его низкую износостойкость, влекущую за собой преждевременное увеличение зазора между уплотнительными кольцами и поясками рабочих колес, т. е. элементами щелевых уплотнений.



Рис. 4. Коррозионное разрушение уплотнительных колец из стали 20X13

Fig. 4. Corrosion wear of 20X13 steel o-rings

Хочется отметить, что значительный зазор между уплотнительными кольцами и поясками рабочих колес электронасосного агрегата, вызванный их истиранием, приводит к значительному росту осевой силы. Увеличенная осевая сила способствует сдвигу ротора электронасосного агрегата до критических значений (2,8...3 мм). Работа насосного оборудования при критическом сдвиге ротора влечет за собой обширные механические повреждения дорогостоящих роторных деталей [6]. Таким образом, видно, что повышение ресурса элементов щелевых уплотнений определенно позволит повысить надежность электронасосных агрегатов.

Согласно натурным исследованиям насосного оборудования моделей НЦС (К) 400–660 и JSH-200, было установлено, что практически за одинаковые периоды работы T вышеназванного насосного оборудования средневзвешенная скорость механического износа m поясков рабочих колес, которые подверглись упрочнению с помощью метода химико-термической обработки, оказалась приблизительно в два раза ниже, чем средневзвешенная скорость износа стандартных поясков рабочих колес (рис. 5). Линейная аппроксимация двух кривых рис. 5 позволяет судить о наличии определенной

взаимосвязи между их координатами. Полученные эмпирические модели в перспективе позволят с высокой степенью достоверности определять фактическое техническое состояние поясков рабочих колес в зависимости от наработки насосного оборудования.

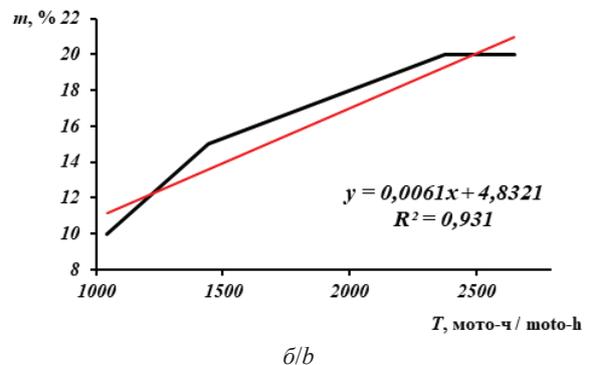
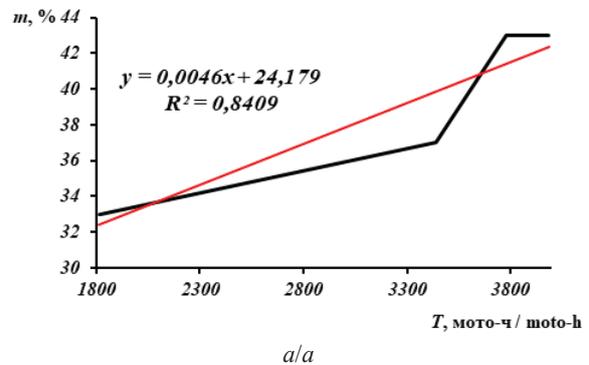


Рис. 5. Зависимость между m и T : а) насосное оборудование модели НЦС (К) 400–660; б) насосное оборудование модели JSH-200

Fig. 5. Dependence between m and T : a) pumping equipment NTsC (K) 400–660; b) pumping equipment JSH-200

Изношенные пояски рабочих колес исследованного насосного оборудования приведены на рис. 6. Как видно из рисунка, упрочненные пояски рабочих колес более подвержены коррозии, чем стандартные пояски рабочих колес.

В связи с тем, что электронасосные агрегаты на кимберлитовых рудниках АК «АЛРОСА» являются одними из наиболее ответственных типов горных машин, они нуждаются в дополнительной защите от работы при критическом осевом сдвиге ротора.

Рекомендуется электронасосные агрегаты кроме датчиков осевого сдвига ротора, вибро- и термодатчиков также оснащать реле протока, которое монтируется в трубе разгрузки.

Необходимость применения реле протока объясняется следующим. Вибро- и термодатчики, как и датчики осевого сдвига ротора являются достаточно «чувствительными» приборами, в связи с чем, им свойственны поломки и сбои в работе, которые могут отрицательно повлиять на их точность в определении величины осевого сдвига ротора электронасосного агрегата, результатом чего,

может быть его дальнейшая работа при фактическом достижении ротором критического осевого положения.

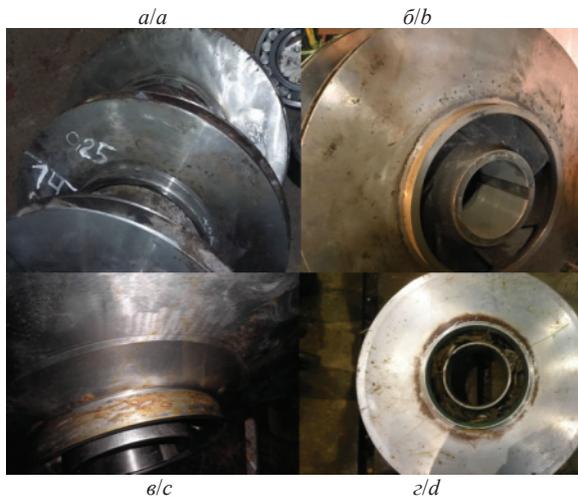


Рис. 6. Пояски рабочих колес: а, б) насосное оборудование модели НЦС (К) 400–660; в, г) насосное оборудование модели JSH-200

Fig. 6. Impellers belts: a, b) pumping equipment NTsC (K) 400–660; c, d) pumping equipment JSH-200

Одновременная неисправность реле протока, датчика осевого сдвига ротора, вибро- и термодатчиков является маловероятным событием.

Реле протока настраивается таким образом, что автоматически отключает электродвигатель электронасосного агрегата при критическом снижении или критическом повышении протока жидкости q в трубе разгрузки. Предельные значения протока жидкости q для электронасосных агрегатов с различной подачей Q могут быть с хорошей степенью достоверности определены, исходя из двух эмпирических моделей, установленных в результате линейной аппроксимации зависимостей, которые в свою очередь были получены экспериментальным путем (рис. 7). Обязательным требованием эффективного функционирования реле протока является его работа с задержкой 10...20 с после запуска в работу электронасосного агрегата (так как проток в трубе разгрузки электронасосного агрегата с плавным пуском нормализуется не сразу) [3, 7].

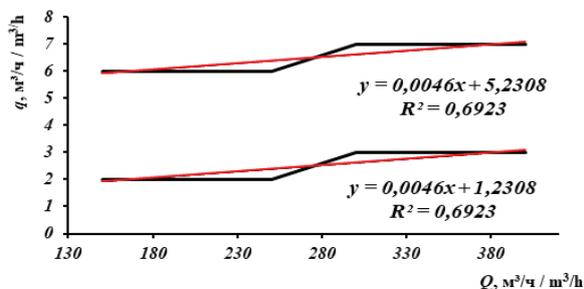


Рис. 7. Зависимость между q и Q

Fig. 7. Dependence between q and Q

Кроме интенсивного износа щелевых уплотнений, росту осевой силы до критических значений может способствовать интенсивный гидроабразивный износ узла гидропята. В публикациях [3, 4, 7–25] отмечается, что именно гидроабразивный износ деталей насосного оборудования является основной причиной его низкой надежности. В публикации [1] отмечается, что между средней нагрузкой узла гидропята до отказа и средним ресурсом насосного оборудования кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА» до капремонта, который обычно производится после его достаточной по времени работы при критическом осевом сдвиге ротора, существует определенная взаимосвязь.

В публикации [3] отмечается, что техническое состояние узла гидропята главным образом зависит от четырех факторов (табл. 1).

Таблица 1. Результаты статистических исследований

Table 1. Results of statistical researches

Фактор Factor	Коэффициент детерминации R^2 Determination coefficient R^2	Значимость F Significance F
Микротвердость механических примесей в рассолах B , ГПа Microhardness of mechanical admixture in saline B , GPa	0,545	0,094
Номинальный напор электронасосного агрегата H , м Electric pump unit nominal head H , m	0,673	0,045
Время разгона и торможения электронасосного агрегата t , с Electric pump unit acceleration and deceleration time t , s	0,61	0,0066
Скорость рассолов на выходе из электронасосного агрегата v , м/с Output speed of saline of the electric pump unit v , m/s	0,61	0,066

В дальнейшем на основании полученных результатов статистических исследований была установлена многофакторная линейная зависимость величины T от вышеназванных факторов (табл. 2) [4]. Проверка значимости полученного уравнения множественной регрессии реализовывалась через F -критерий Фишера. В процессе проверки из данного уравнения регрессии был выведен фактор t .

Таблица 2. Результаты статистических исследований

Table 2. Results of statistical researches

Уравнение регрессии Regression equation	Коэффициент детерминации R^2 Determination coefficient R^2	Значимость F Significance F
$Y = -108,13v - 65,21B - 0,26H + 1712,1$	0,937	0,092

Как видно, полученная эмпирическая модель в перспективе позволяет с высокой степенью достоверности прогнозировать наработку до отказа узла гидропаты насосного оборудования кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА» в зависимости от модели насосного оборудования и физико-механических характеристик рассолов.

Стоит отметить, что в условиях кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА» узел гидропаты является наименее надежным элементом в конструкции электронасосных агрегатов [3]. После узла гидропаты наименее надежными конструкционными элементами являются подшипники, на что имеет ряд объяснений [3].

В настоящее время только у пяти из 35 исследованных электронасосных агрегатов кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА» решена проблема попадания рассолов в камеры подшипниковых узлов [5]. Рассолы, попадающие в камеру подшипника в результате химической реакции, практически полностью растворяют масляную пленку, активизируя тем самым трибоконтакт между сегментами подшипника.

Также не решена проблема разрушения подшипников при транспортировке электронасосных агрегатов. К примеру, как видно из рис. 8, после доставки насосного оборудования из компании ООО «Линк-Продукт» (г. Тула) на место эксплуатации (Удачинский ГОК) его подшипники качения были практически сразу заменены [25].

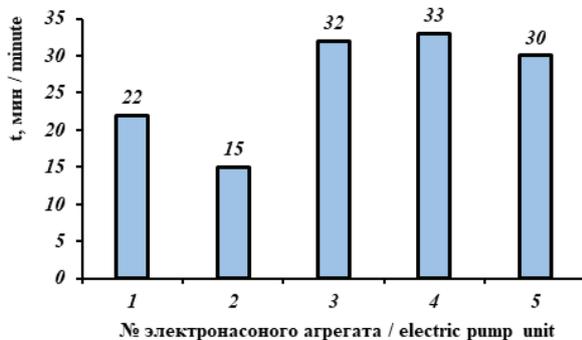


Рис. 8. Ресурс заднего подшипника пяти электронасосных агрегатов

Fig. 8. Resource of back bearing of five electric pumping units

Скорее всего, данный постулат объясняется следующим. Из-за низкого качества дорожного полотна в Западной Якутии при перевозке электронасосного агрегата его вал совершает возвратно-поступательные движения на величину зазора в подшипниках качения по наружной и внутренней обоймам. Зазоры в подшипнике по обоймам идентичны друг другу. Сделав ряд допущений, можно констатировать, что при перевозке насосного оборудования нагрузка F на его подшипники качения может увеличиваться в два раза, что в конечном итоге отрицательно сказывается на их состоянии (2).

$$F = mg \left(\frac{c}{s} + 1 \right), \quad (2)$$

где m – масса ротора электронасосного агрегата; g – ускорение свободного падения; c, s – зазоры в подшипнике качения по наружной и внутренней обоймам.

На сегодняшний день в мире существует множество путей повышения надежности насосного оборудования, эксплуатируемого при подземной разработке рудных месторождений, часть которых как раз описана в настоящей работе.

Заключение

1. Наиболее тяжелые условия работы для силовых установок действующих электронасосных агрегатов кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА» отмечаются в случаях, когда фактический полный напор h составляет от 600 м. Для снижения риска отказов электродвигателей при $h > 600$ м рекомендуется либо их заменить на более энергоемкие модели, либо в перспективе использовать более высоконапорное насосное оборудование. Из всего рассмотренного насосного оборудования вышеназванных рудников только насосное оборудование водоотливной установки ВНС-163 кимберлитового рудника «Айхал» используется эффективно ($H/h=1,51$ – для насосного оборудования модели ЦНСКА 300–480 и $H/h=1,545$ – для насосного оборудования модели ЦНСКА 105–490).
2. Проведенные натурные исследования насосного оборудования моделей НЦС (К) 400–660 и JSH-200 свидетельствуют, что практически за одинаковые периоды работы T вышеназванного насосного оборудования средневзвешенная скорость механического износа m поясков рабочих колес, которые подверглись упрочнению с помощью метода химико-термической обработки, оказалась приблизительно в два раза ниже, чем средневзвешенная скорость износа стандартных поясков рабочих колес. Эмпирические модели, полученные на основе линейной аппроксимации зависимостей $m=f(T)$, в перспективе позволят с высокой степенью достоверности определять фактическое техническое состояние поясков рабочих колес в зависимости от наработки насосного оборудования.
3. Электронасосные агрегаты кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА» кроме датчиков осевого сдвига ротора, вибро- и термодатчиков также рекомендуется оснащать реле протока, которое монтируется в трубе разгрузки. Реле протока настраивается таким образом, что автоматически отключает электродвигатель электронасосного агрегата при критическом снижении или критическом повышении протока жидкости q в трубе разгрузки. Предельные значения протока жидкости q для электронасосных агрегатов с различной подачей Q могут быть с хорошей степенью достоверности определены, исходя из эмпирических моделей, установленных в результате линейной аппроксимации зависимостей $q=f(Q)$, которые в свою

очередь были получены экспериментальным путем.

4. По результатам статистической обработки значительного практического материала была установлена эмпирическая модель, позволяющая с высокой степенью достоверности прогно-

зировать наработку до отказа наиболее отказывающего конструкционного элемента электронасосного агрегата – узла гидропаты в зависимости от модели насосного оборудования и физико-механических характеристик рассолов кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов А.В. Оценка возможности закачки дренажных рассолов карьера и рудника «Удачный» в среднекембрийский водоносный комплекс // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 7 (28). – С. 32–40.
2. Дроздов А.В., Крамсков Н.П., Гензель Г.Н. Особенности гидромеханического мониторинга под водными объектами на алмазных месторождениях Западной Якутии // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – № 1 (48). – С. 72–79.
3. Овчинников Н.П., Зырянов И.В. Оценка долговечности секционных насосов подземных кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА» // Горный журнал. – 2017. – № 10. – С. 41–44.
4. Ovchinnikov N.P., Portnyagina V.V., Sobakina M.P. Dependence of the mean time failure a hydraulic balancing machine unit on different factors for sectional pumps of the Alrosa JSC // AIP Conference Proceedings. – 2017. – V. 1915. – 040043.
5. Овчинников Н.П. Опыт эксплуатации секционных насосов на подземном кимберлитовом руднике «Мир» // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – № 53. – С. 119–126.
6. Стюфляев С.С., Шипулин О.Г. Сравнительный анализ многоступенчатого насоса типа ЦНС с оппозитным расположением рабочих колес и гидропаты // Молодой ученый. – 2017. – № 3. – С. 165–171.
7. Vikulov M.A., Ovchinnikov N.P., Makhno D.E. Measurements of section pump of rotor axial position at Udachny mine // Advances in Engineering Research. – 2017. – V. 133. – P. 884–891.
8. Анализ эффективности разгрузочных устройств шахтных центробежных секционных насосов / А.В. Долганов, А.О. Еслетьев, Е.О. Черяков, Э.Ю. Торопов // Известия Уральского государственного горного университета. – 2014. – № 2 (34). – С. 31–35.
9. Долганов А.В. Влияние гидроабразивного износа элементов проточной части на эксплуатационные качества центробежных насосов медно-колчеданных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 8. – С. 181–186.
10. Yoganandh J., Natarajan S., Kumaresh Babu S.P. Erosive wear behavior of high-alloy cast iron and duplex stainless steel under mining conditions // Journal of Materials and Performance. – 2015. – V. 24 (9). – P. 3588–3598.
11. Hydraulic transient numerical study of super-high parameter motor-pump in drainage system of mine emergency / Weihui Xu, Chuanchang Gao, Jun Liu, Weishu Wang // Energy Procedia. – 2012. – V. 14. – P. 464–469.
12. Numerical simulation of concrete pumping process and investigation of wear mechanism of the piping wall / Yuanqiang Tan, Hao Zhang, Dongmin Yang, Shengqiang, Junhua Song, Yong Sheng // 37th Leeds-Lyon Symposium on Tribology Special issue: Tribology for Sustainability: Economic, Environment, and Quality of Life: Tribology International. – Lyon (France), 2012. – V. 46 (1). – P. 137–144.
13. Ramkrishna Dandapat, Arghya Deb. A probability based model for the erosive wear of concrete by sediment bearing water // Wear. – 2016. – V. 350. – P. 166–181.
14. Khalid Y.A., Sapuan S.M. Wear analysis of centrifugal slurry pump impellers // Industrial lubrication and tribology. – 2007. – V. 59. – № 1. – P. 18–28.
15. Walker C.I. Slurry pump side-liner wear: comparison of some laboratory and field results // Wear. – 2001. – V. 250–251. – № 2. – P. 81–87.
16. Walker C.I., Bodkin G.C. Empirical wear relationships for centrifugal slurry pumps. P. 1: side-liners // Wear. – 2000. – V. 242. – № 1–2. – P. 140–146.
17. Wilson R.D., Hawk J.A. Impeller wear impact-abrasive wear test // Wear. – 1999. – V. 225–229. – № 1–2. – P. 1248–1257.
18. Sundström A., Rendón J., Olsson M. Wear behaviour of some low alloyed steels under combined impact/abrasion contact conditions // Wear. – 2001. – V. 250. – № 1–12. – P. 744–754.
19. Kesler R. Considerations is selecting a positive displacement slurry pump // Mining World. – 2016. – V. 13 (4). – P. 34–37.
20. Kranzler Th., Raimo A. Improving pump materials for harsh environments // Sulzer Technical Review. – 2013. – V. 2. – P. 10–12.
21. Меньшиков С.С., Васильева М.А. Коэффициент технического состояния грунтового насоса в системах гидротранспорта хвостовых пульп // Записки Горного института. – 2014. – Т. 209. – С. 193–196.
22. Давыдов Я.М., Рязанов С.Д., Алексеенцева Л.В. Оценка остаточного ресурса центробежных насосов с учетом износа основных деталей // Химическая техника. – 2016. – № 3. – С. 34–36.
23. Dauletbikuly O., Bayjumanov K.D. Methods of increase of wear resistance and resource of operation of soil pumps // International Journal of Mathematics and Physics. – 2015. – V. 1. – P. 4–7.
24. Patsera S., Protsiv V., Kosmin V. Feasible Ways to Improve the Durability of the Pumps' Parts Operating with Hydroabrasive Mixtures // Mechanics, Materials Science & Engineering. – 2015. – V. 1. – P. 133–137.
25. Овчинников Н.П., Смыслов А.Г. Некоторые проблемы эксплуатации насосов главного водоотлива подземного рудника «Удачный» // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск. Геомеханические и геотехнологические проблемы освоения недр Севера. – 2017. – № 24. – С. 83–92.

Поступила 15.03.2018 г.

Информация об авторах

Овчинников Н.П., кандидат технических наук, доцент кафедры горного дела Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

UDC 621.671.22

PROBLEMS OF OPERATION OF ELECTRIC PUMPING SECTIONAL TYPE UNITS ON KIMBERLITE MINES OF ALROSA AND THE WAYS OF THEIR SOLUTION

Nickolay P. Ovchinnikov,
ovchinnlar1986@mail.ru

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,
58, Belinsky Street, Yakutsk, 677000, Russia.

The relevance. Russian Federation is one of the world's leaders in diamond industry. Today, the predominant part (about 95 %) of all Russian diamonds is mined on ore (kimberlite) and alluvial deposits, which are located on the territory of Yakutia. Practice shows that underground mining of kimberlite fields in Western Yakutia is associated with the abundant water flow to mine workings. Without application of sufficient number of pumping equipment, water penetrating to mine workings makes diamond extraction more difficult and unsafe for people. Today, for dealing with mine water inflows the electric pump sectional type unit are used on kimberlite mines. As mine drainage is an essential process in diamond extraction, improving the reliability of the related equipment is the relevant scientific and practical task.

Objects: electric pumping sectional type units of kimberlite mines «Mir», «Udachny», «Internatsionalny» and «Aykhal».

The main aim of the research is to study the influence of different production factors, mainly hydrogeological conditions, on durability of pumping equipment of kimberlite mines drainage systems of «ALROSA» JSC.

Methods. To achieve this aim the author has used a comprehensive approach including: analysis of the physico-chemical composition of mine waters, analysis of significant practical material by these pumping equipment work and previously published articles on the subject of research, experimental researches of kimberlite mines electric pump units of «ALROSA» JSC.

Results. According to the results of the researches, the author proposed the recommendations for improving reliability of a pumping equipment of kimberlite mines drainage units, which are administered by «ALROSA» JSC.

Key words:

Mine, electric pump units, drainage, density, corrosion, impeller, hydroabrasive wear.

REFERENCES

1. Drozdov A.V. Assessing possibility to pump open pit and mine «Udachny» drainage brines into middle Cambrian aquiferous complex. *Bulletin of the Irkutsk state technical university*, 2013, Iss. 7, no. 28, pp. 32–40. In Rus.
2. Drozdov A.V., Kramskov N.P., Genzel G.N. Features of hydro-mechanical monitoring under water bodies at diamond deposits of Western Yakutia. *Bulletin of the Irkutsk state technical university*, 2011, Iss. 1, no. 48, pp. 72–79. In Rus.
3. Ovchinnikov N.P., Zyryanov I.V. Assessment of durability of sectional pumps in underground kimberlite mines of ALROSA. *Mining Journal*, 2017, no. 10, pp. 41–44. In Rus.
4. Ovchinnikov N.P., Portnyagina V.V., Sobakina M.P. Dependence of the mean time failure a hydraulic balancing machine unit on different factors for sectional pumps of the Alrosa JSC. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1915, 040043.
5. Ovchinnikov N.P. Experience of operation of sectional pumps on the underground kimberlite mine «Mir». *Bulletin of the Kuzbass state technical university*, 2017, no. 53, pp. 119–126. In Rus.
6. Styuflyayev S.S., Shipulin O.G. Comparative analysis of multi-stage pump type CNS boxer arrangement of impellers and hydraulic balance machine unit. *Young scientist*, 2017, no. 3, pp. 165–171. In Rus.
7. Vikulov M.A., Ovchinnikov N.P., Makhno D.E. Measurements of section pump of rotor axial position at Udachny mine. *Advances in Engineering Research*, 2017, vol. 133, pp. 884–891.
8. Dolganov A.V., Esentev A.O., Cherakov E.O., Toropov E.Yu. Analysis of effectiveness of dumping devices of mine centrifugal sectional pumps. *News of the Ural State Mining University*, 2014, Iss. 1, no. 34, pp. 31–35. In Rus.
9. Dolganov A.V. The influence of hydro-abrasive depreciation of excretory elements on exploitation qualities of rotary pumps at copper and pyrites pits. *Mining informational and analytical bulletin*, 2015, no. 8, pp. 181–186. In Rus.
10. Yoganandh J., Natarajan S., Kumaresh Babu S.P. Erosive wear behavior of high-alloy cast iron and duplex stainless steel under mining conditions. *Journal of Materials and Performance*, 2015, vol. 24, no. 9, pp. 3588–3598.
11. Weihui Xu, Chuanchang Gao, Jun Liu, Weishu Wang. Hydraulic transient numerical study of super-high parameter motor-pump in drainage system of mine emergency. *Energy Procedia*, 2012, vol. 14, pp. 464–469.
12. Yuanqiang Tan, Hao Zhang, Dongmin Yang, Shengqiang, Junhua Song, Yong Sheng. Numerical simulation of concrete pumping process and investigation of wear mechanism of the piping wall. *37th Leeds-Lyon Symposium on Tribology Special issue: Tribology for Sustainability: Economic, Environment, and Quality of Life: Tribology International*. Lyon (France), 2012. Vol. 46, no. 1, pp. 137–144.
13. Ramkrishna Dandapat, Arghya Deb. A probability based model for the erosive wear of concrete by sediment bearing water. *Wear*, 2016, vol. 350, pp. 166–181.
14. Khalid Y.A., Sapuan S.M. Wear analysis of centrifugal slurry pump impellers. *Industrial lubrication and tribology*, 2007, vol. 59, no. 1, pp. 18–28.
15. Walker C.I. Slurry pump side-liner wear: comparison of some laboratory and field results. *Wear*, 2001, vol. 250–251, no. 2, pp. 81–87.
16. Walker C.I., Bodkin G.C. Empirical wear relationships for centrifugal slurry pumps. P. 1: side-liners. *Wear*, 2000, vol. 242, no. 1–2, pp. 140–146.
17. Wilson R.D., Hawk J.A. Impeller wear impact-abrasive wear test. *Wear*, 1999, vol. 225–229, no. 1–2, pp. 1248–1257.
18. Sundström A., Rendón J., Olsson M. Wear behaviour of some low alloyed steels under combined impact/abrasion contact conditions. *Wear*, 2001, vol. 250, no. 1–12, pp. 744–754.
19. Kesler R. Considerations is selecting a positive displacement slurry pump. *Mining World*, 2016, vol. 13, no. 4, pp. 34–37.
20. Kranzler Th., Raimo A. Improving pump materials for harsh environments. *Sulzer Technical Review*, 2013, vol. 2, pp. 10–12.
21. Menshikov S.S., Vasileva M.A. Coefficient of technical condition of a soil pump system the hydraulic transport tailing slurries.

- Proceedings of the Mining institute*, 2014, vol. 209, pp. 193–196. In Rus.
22. Davydov Ya.M., Ryazanov S.D., Aleksentseva L.V. Evaluation of a centrifugal pumps residual resource subject to wear of basic parts. *Chemical engineering*, 2016, no. 3, pp. 34–36. In Rus.
23. Dauletbikuly O., Bayjumanov K.D. Methods of increase of wear resistance and resource of operation of soil pumps. *International Journal of Mathematics and Physics*, 2015, vol. 1, pp. 4–7.
24. Patsera S., Protsiv V., Kosmin V. Feasible Ways to Improve the Durability of the Pumps' Parts Operating with Hydroabrasive Mixtures. *Mechanics, Materials Science & Engineering*, 2015, vol. 1, pp. 133–137.
25. Ovchinnikov N.P., Smyslov A.G. Some problems of operation of the main drainage of underground mine «Udachny» pumps. *Mining informational and analytical bulletin. Special issue. Geomechanical and geotechnological problems of development of mineral resources of the North*, 2017, no. 24, pp. 83–92. In Rus.

Received: 15 March 2018.

Information about the authors

Nickolay P. Ovchinnikov, Cand. Sc., associate professor, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

УДК 550.424.6:504.4:628.31.034.2(574.41)

ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ ФОРМ НАХОЖДЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Торопов Андрей Сергеевич,
torop990@gmail.com

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

Актуальность исследования определяется способностью техногенных радионуклидов, содержащихся в значимых количествах в поверхностных водных объектах Семипалатинского испытательного полигона, перемещаться за пределы площадок ядерных испытаний. Эта способность определяется формой нахождения радиоактивных элементов. Вопрос миграции и форм нахождения техногенных радионуклидов в реальных водных объектах в настоящий момент изучен недостаточно, чтобы прогнозировать поведение радиоактивных элементов на долгосрочной основе.

Цель работы: изучить формы нахождения техногенных радионуклидов в водных объектах Семипалатинского испытательного полигона.

Методы. Распределение форм нахождения радиоактивных элементов изучали методом последовательного каскадного фракционирования. Водородный показатель воды измеряли потенциометрически с использованием прибора Анион-4100. Анализ компонентов химического состава воды и минерализации выполнен в соответствии с ГОСТ 26449.1–85. Содержание растворенного органического вещества определялось методом бихроматной окисляемости с фотометрическим окончанием на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ. Для оценки содержания радиоактивных изотопов использовали методы радиохимического выделения с приготовлением счетного образца для альфа-спектрометрии ($^{239+240}\text{Pu}$), жидкосцинтиляционной бета-спектрометрии (^{90}Sr), а также гамма-спектрометрии с высокочувствительным полупроводниковым детектором колодезного типа на основе особо чистого германия с предварительным концентрированием для ^{137}Cs и ^{241}Am .

Результаты. Метод каскадного фракционирования при использовании комплекта мембран с убывающим размером пор подходит для выделения взвешенных, псевдоколлоидных, коллоидных и растворенных форм в природных водах. Установлен химический и изотопный состав отдельных водных объектов Семипалатинского испытательного полигона, содержание и формы нахождения радионуклидов. Выявлено, что ^{137}Cs в воде мигрирует в коллоидной и растворенной формах, преобладающая форма нахождения ^{90}Sr – растворенная, фракционирование $^{239+240}\text{Pu}$ индивидуально для каждого объекта. Для воды водотока штольни № 177 характерно преобладание растворенных форм для всех изученных радионуклидов.

Ключевые слова:

Формы нахождения, фракционирование, природные воды, радиоактивные элементы, техногенные радионуклиды, взвешенные вещества, псевдоколлоиды, коллоиды

Введение

Развитие атомной энергетики и производство ядерного топлива ставят глобальный вопрос прогнозирования развития радиационной обстановки вблизи объектов ядерно-топливного цикла. В то же время радиационная обстановка вблизи радиационно-опасных территорий, таких как Семипалатинский испытательный полигон (СИП), всегда будет объектом внимания общественности. Поведение радиоактивных элементов вблизи радиационно-опасных объектов, скорость и интенсивность их миграции и влияние на здоровье населения являются очень актуальной научной и практической проблемой [1–4].

С середины XX в. значительные количества техногенных радионуклидов попали в окружающую среду [5, 6]. Данные выбросы были результатом атмосферных ядерных испытаний [1, 6, 7], ядерных катастроф в Чернобыле и на Фукусиме [8, 9], а также утечки из хранилищ радиоактивных отходов на ПО «Маяк» [2, 10] и Хэнфорд, США [11].

За период испытаний в атмосфере на СИП в окружающую среду было выброшено порядка 100 Ки/км^2 различных радионуклидов [1, 3].

Водная среда является основным путем транспорта загрязнителей, в том числе и радионукли-

дов, на дальние расстояния. Техногенные радионуклиды могут содержаться в значимых количествах в поверхностных водных объектах СИП и представлять потенциальную опасность для экосистем и человека, перемещаясь за территорию площадок испытаний. В особенности стоит принимать во внимание периоды полураспада трансурановых элементов, которые достигают десятков тысяч лет, что обуславливает их длительное пребывание в биосфере.

В настоящее время проведено большое количество исследований, направленных на изучение поведения техногенных радионуклидов в наземных экосистемах [12]. При этом установлено, что основными параметрами, влияющими на миграционный процесс, являются формы нахождения радионуклидов в воде и ландшафтно-геохимические условия природной среды [13, 14].

Актуальность исследования также обусловлена трудностью изучения физико-химических форм техногенных радионуклидов, которые способны мигрировать с поверхностными водами во взвешенном, коллоидном либо растворенном состоянии. Физико-химические механизмы транспорта техногенных радионуклидов с водой исследованы недостаточно, что связано как с методическими

трудностями, так и с объективной сложностью определения форм нахождения радионуклидов и элементов в водных системах из-за их ультрамалых количеств [15, 16].

Для формирования качественной физико-химической модели миграции и математической модели массопереноса техногенной радиоактивности необходимо более детальное изучение состояния радионуклидов, их сорбционного взаимодействия с компонентами водных систем и способности изменять форму нахождения в зависимости от основных физико-химических параметров воды. Для этого требуется изучение вероятных форм нахождения техногенных радионуклидов в реальных пробах.

В окружающей среде радионуклиды могут находиться как в легко-, так и в труднорастворимых формах [17], что определяется источниками их поступления и влияет в дальнейшем на их миграцию. Изначально доступным для исследований было лишь суммарное содержание радиоактивных элементов в воде либо их распределение между взвешенной и растворенной формами. Такая оценка в настоящий момент считается недостаточной, так как биологическое воздействие радиоактивных элементов в воде определяется их способностью образовывать коллоиды либо связываться коллоидами [18]. Считалось, что радионуклиды в легкорастворимых формах (прежде всего в ионной) обладают существенно большей подвижностью в окружающей среде, чем в труднорастворимых, но последние могут мигрировать в составе коллоидных частиц различной природы [2, 4, 5 19–22]. Так, было установлено, что $^{239+240}\text{Pu}$ в составе коллоидных частиц обладал существенно большей подвижностью, чем было предсказано с позиций термодинамического моделирования [23–25]. Коллоидные частицы могут в значительной степени определять мобильность радионуклидов в водных системах, но детальных исследований физико-химических форм радиоактивных элементов, в особенности трансурановых, в природных водах весьма немного. В работах [2, 4, 18, 19, 26] подчеркивается, что описание характера миграции $^{239+240}\text{Pu}$ с подземными водами невозможно без учета вклада коллоидных частиц в этот процесс. Например, недооценка механизма «коллоидного переноса» для данного радионуклида привела к ошибкам в расчетах скорости миграции данного радионуклида в подземных водах на Невадском полигоне [18, 26, 27]. Велика роль растворенных органических веществ, непосредственно влияющих на долю переносимых в форме коллоидов и псевдоколлоидов радионуклидов, в воде [27]. Общепринятой модели миграции радиоактивных элементов, учитывающей роль коллоидных частиц, пока нет [2, 19]. Кроме этого, природные системы содержат значительные количества минералов и органических веществ, для которых характерны как окислительные, так и восстановительные свойства, поэтому теоретический расчет преобла-

дающих окислительно-восстановительных форм радионуклидов для реальных объектов затруднителен и также может привести к ошибочным результатам [2, 4, 10, 18].

Ранее на территории СИП также проводились отдельные исследования содержания радиоактивных элементов и форм их нахождения в водных объектах [28, 29]. Авторами изучены формы нахождения $^{239+240}\text{Pu}$ и U в колодезной воде поселка «Саржал», находящегося в близости границ СИП, колодцев зимовок «Северной» части СИП, ручья Узынбулак, реки Шаган, а также озер Телькем-1 и Телькем-2 [28]. В указанных работах определялось взвешенное вещество, окисленные формы U и Pu (степени окисления (+5), (+6), суммарно), восстановленные формы U и $^{239+240}\text{Pu}$ (степени окисления (+3), (+4), суммарно) методом введения ограниченной концентрации железа и последовательного осаждения восстановленных и окисленных форм. По данным [29] в воде из воронки взрыва «Телькем-2» от 89 до 98 % Pu находилось в состоянии (+3), (+4), оставшаяся часть, по их предположению, находилась в состоянии (+6). Высокую долю восстановленных форм плутония они связывают с присутствием в воде большого количества растворенных органических веществ.

Существует ряд методов, которые позволяют изучать формы нахождения техногенных радионуклидов, токсичных элементов и других микрокомпонентов природных вод. К ним относятся ультрафильтрация, ультрацентрифугирование, обратный осмос, электрофорез, мембранная экстракция, ряд инструментальных микроскопических и спектроскопических методов (электронная микроскопия, масс-спектрометрия с вторичной ионизацией, рентгеновская спектроскопия и др.), а также их комбинации [30].

Для разделения истинно растворенных, коллоидных и взвешенных форм нахождения в природных водах наиболее приемлемым является метод каскадного фракционирования, который позволяет выделять формы нахождения радионуклидов в зависимости от размера частиц при ступенчатом фильтровании с убыванием размеров пор фильтра.

Объекты и методы исследования

Выбор объектов исследования для изучения форм нахождения радионуклидов в воде определялся на основе результатов проведенных исследований и литературного материала по содержанию радионуклидов в водных объектах СИП [31–33]. Для исследования механизма «коллоидного транспорта» было принято решение более подробно изучить водные объекты СИП, где фиксировались максимальные уровни содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в воде (выше 0,1 Бк/л) [1].

Объектами исследования послужили водотоки припортовых участков штолен № 177 и 503 площадки «Дегелен», воронка В-1 площадки «Опытное поле», а также озеро Телкем-2.

Отбор проб воды проводился в соответствии с

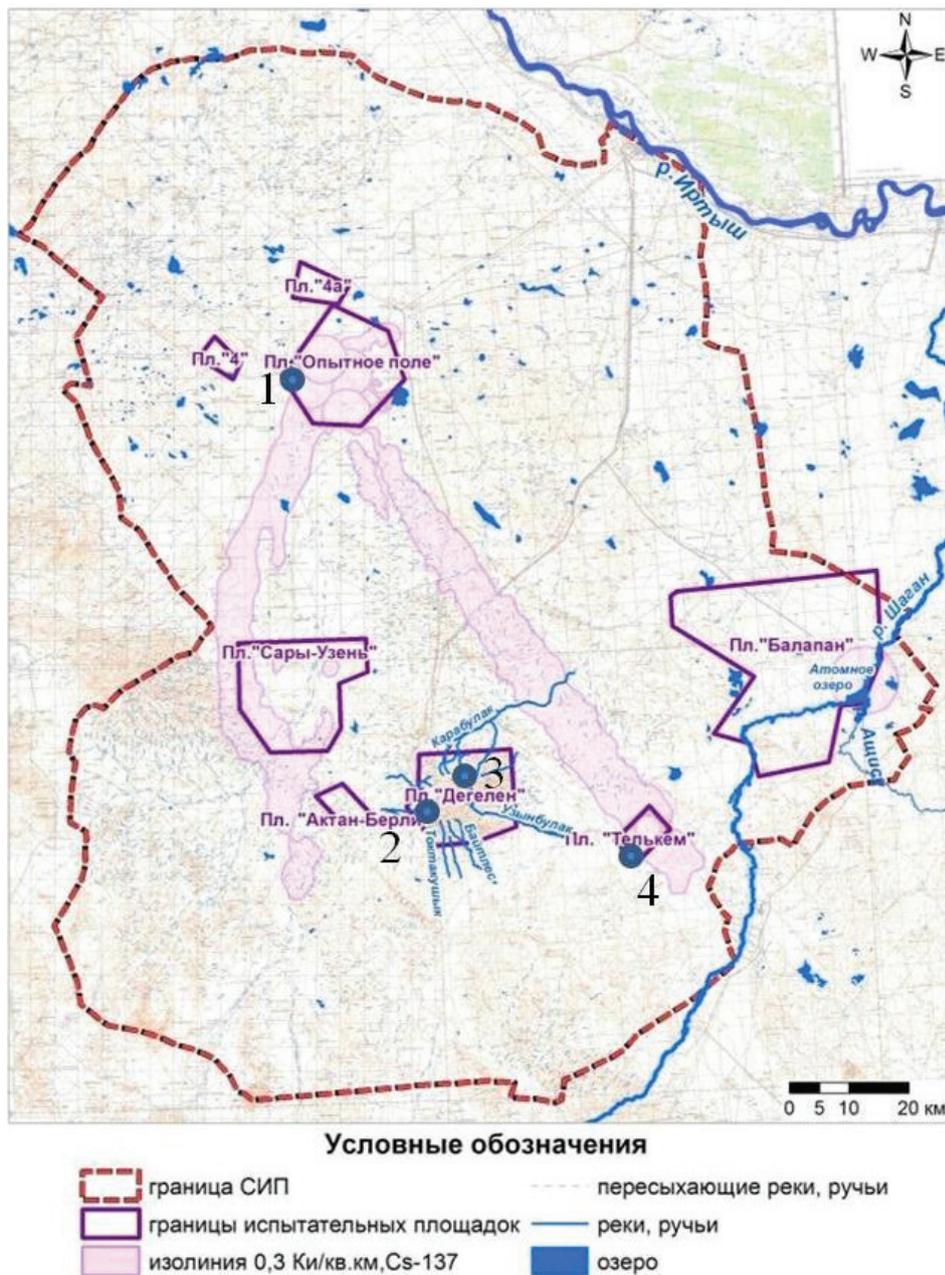


Рис. 1. Схема отбора проб воды на территории СИП: 1 – воронка В-1 площадки «Опытное поле»; 2 – водоток штольни № 503 площадки «Дегелен»; 3 – водоток штольни № 177 площадки «Дегелен»; 4 – озеро «Телкем-2»

Fig. 1. Scheme of water sampling on Semipalatinsk Test Site (STS) territory: 1 is the V-1 crater lake of «Opytnoe pole»; 2 is no. 503 tunnel outflowing waterstream of «Degelen» ground; 3 is no. 177 tunnel outflowing waterstream of «Degelen» ground; 4 is the «Telkem-2» crater lake

ГОСТ 17.1.5.05–85 «Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков», избегая мест слабого водообмена. Объем проб воды составлял 10 л. Пробу отбирали в чистые полиэтиленовые емкости, избегая попадания посторонних примесей. Эксперименты по каскадной фильтрации осуществляли непосредственно на месте, сразу после отбора проб.

В основе методологии данного исследования лежит метод каскадной фильтрации, который позволяет выделять взвешенные, коллоидные и раство-

ренные формы радионуклидов и микроэлементов.

С целью выделения различных форм нахождения радионуклидов был выбран каскад из шести фильтров, который позволяет выделять взвешенные, растворенные формы нахождения, а также коллоиды и псевдоколлоиды различного размера. Изначально проводили префильтрацию проб, при помощи нейлонового сетчатого фильтра с размером пор 10000 нм. В ходе фракционирования водный раствор последовательно пропускали через фильтры с различным диаметром пор – от

10000 нм (самые крупные) до 3 нм (самые мелкие). На последних ступенях фильтрации для определения коллоидных форм нахождения были использованы ультрафильтрационные мембраны. Эти фильтры способны задерживать молекулы определенного размера, зависящие от размера пор, которые можно выразить через номинальную отсекаемую молекулярную массу. Принято считать, что 90 % незаряженных молекул сферической формы молекулярной массы задержится на мембране [34]. Таким образом, мембраны с размерами 3 и 7 нм отсекают молекулы с молекулярной массой 10 и 100 кДа соответственно. Такое обозначение по величине отсекаемой молекулярной массы является общепринятым для фильтров с диаметром пор, близким к размерам молекул веществ [2, 4, 14, 15, 27].

На рис. 2 представлена схема последовательной каскадной фильтрации при определении форм нахождения техногенных радионуклидов в воде и принятые обозначения для каждой фракции, которых придерживались в данной работе.

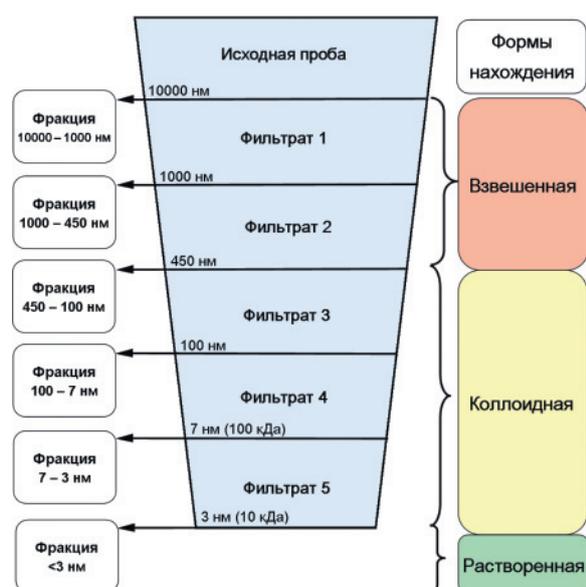


Рис. 2. Схема последовательной каскадной фильтрации для определения форм нахождения техногенных радионуклидов

Fig. 2. Scheme of sequential cascade filtration for technogenic radionuclides speciation

Таким образом, указанными фильтрами с определенной селективностью можно извлекать из воды взвешенные вещества, псевдоколлоиды, коллоиды различного размера, в том числе низкомолекулярные соединения гуминовых и фульвокислот, а также другие компоненты.

Тем не менее, необходимо иметь в виду определенную условность такого разделения, поскольку размер частиц различной природы в природных водах перекрывается и в отдельных фракциях могут присутствовать частицы различного происхождения. Так, к примеру, для диапазона 100–1000 нм характерны частицы взвешенного

вещества, коллоиды гидроксидов Fe, агрегаты молекул органического вещества гуминовой природы, а также бактерии. Данный факт необходимо принимать во внимание при интерпретации экспериментальных данных.

В процессе каскадной фильтрации после каждой ступени отбиралась аликвота объемом 1500 мл. Параллельно из каждого полученного раствора отбиралась аликвота объемом 20 мл для определения содержания растворенного органического углерода.

В аликвоты проб, отобранные в процессе каскадной фильтрации для радиохимического анализа, добавляли концентрированную HNO_3 до $\text{pH}=1-2$ и подогревали при температуре $90-95^\circ\text{C}$ в течение 2 часов для перевода всех форм нахождения в растворенную и предотвращения адсорбционных потерь, после чего пробы передавались на определение радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$. В случае если в образцах воды фиксировались значения растворенного органического углерода выше предела обнаружения, пробы для радиохимического анализа дополнительно обрабатывались концентрированной H_2O_2 из расчета 1 мл на 1 л воды и кипятились дополнительно до полного улетучивания перекиси водорода аналогично аналитическим процедурам, используемым при радиохимическом выделении изотопов радионуклидов.

Макрокомпонентный состав воды и величину минерализации определяли в соответствии с ГОСТ 26449.1–85. pH определялся потенциометрически с помощью иономера Анион-4100. Содержание органического вещества измеряли методом бихроматной окисляемости с фотометрическим окончанием на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ.

Радиохимические и спектрометрические анализы проводились по стандартным методикам. Определение ^{137}Cs и ^{241}Am проводили гамма-спектрометрическим методом на гамма-спектрометре с полупроводниковым детектором из особо чистого Ge колодезного типа производства ORTEC после предварительного концентрирования с добавлением меток ^{134}Cs и ^{243}Am , ^{90}Sr – методом бета-спектрометрии с использованием жидкосцинтилляционного спектрометра TriCarb серии 2900, удельную активность $^{239+240}\text{Pu}$ определяли после предварительного радиохимического выделения с электроосаждением на металлическом диске методом альфа-спектрометрии с использованием спектрометрической установки Alpha Analyst, производства Canberra.

Следует отметить, что из-за инструментальной погрешности измерений радионуклидов в фильтрате, которая могла достигать 20 %, после этапов каскадного фракционирования часто наблюдалось недостаточное изменение остаточной удельной активности изучаемых радиоактивных элементов. Так, например, при использовании в расчетах долей форм нахождения по разнице удельной активности в фильтрате для ^{90}Sr , все 100 % будут относиться к фракции менее 3 нм, однако данный радионуклид

фиксируется непосредственно на фильтрах. Поэтому фильтры, использованные для фракционирования, подвергали кислотному разложению и измеряли в них содержание радионуклидов. Это позволило выявить более достоверное распределение радиоактивных элементов при фракционировании.

Результаты и их обсуждение

Изученные водные объекты СИП представляют собой водоемы и водотоки, что важно различать для понимания условий миграции радионуклидов. К первым можно отнести озеро воронки В-1 площадки «Опытное поле», а также озеро «Телкем-2». В отличие от озер, водотоки (водотоки припортовых участков штолен площадки «Дегелен») являются подвижной динамической средой.

Физико-химические параметры изученных водоисточников, а также их макрокомпонентный состав представлены в таблице.

Как видно из таблицы, изученные водоисточники существенно различаются между собой, по степени минерализации и значениям общехимических параметров воды. Так, воды водотоков штолен площадки «Дегелен» являются пресными, воды водоемов В-1 и Телкем-2 – солоноватыми. По значению рН воды исследованных объектов являются нейтральными либо слабощелочными.

Содержание органических веществ во всех изученных водных объектах было ниже предела обнаружения (<5 мг/л), за исключением воды воронки В-1, где содержание растворенного органического углерода составило 35 мг/л.

По анионно-катионному составу воды водотока штольни № 177 были сульфатно-гидрокарбонатными натриево-кальциевыми, штольни № 503 – сульфатными кальциевыми, озера «Телкем-2» – хлоридно-сульфатными натриевыми, воронки В-1 – сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатными натриевыми.

Водный режим изученных объектов и характер их питания может оказать влияние на распространение радионуклидного загрязнения и распределение форм их нахождения. Для этого был изучен изотопный состав природных вод (рис. 3).

Как видно из рисунка, водотоки припортовых штолен существенно отклоняются от линии метеорных вод. Такое распределение можно объяснить либо испарительным концентрированием инфльтрационных вод метеогенного формирования за счет весеннего стока, либо существованием источника питания штольневых вод в условиях литологической и гидрогеологической закрытости, а также сочетанием данных факторов. Единичные данные изотопного состава ввиду большого многообразия накладывающихся факторов, направленность которых может быть различной, не позволяют сделать однозначные выводы. Изотопный состав стабильных изотопов $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ воды воронки В-1 совпадает с локальной линией метеорных вод, что говорит о питании водоема за счет осадков. Вода озера «Телкем-2» по изотопному составу близка к линии метеорных вод. Небольшой сдвиг изотопного состава может объясняться конденсированием испаренной влаги с водного зеркала озера в поверхностном слое, где производился отбор проб.

Исследованиями С.Б. Субботина и Ю.В. Дубасова [33] установлено, что проведение подземных ядерных взрывов на площадке «Дегелен» СИП привело к значительной деформации массива горных пород и образованию зон дробления, провальных воронок и трещин. Данные явления способствовали улучшению проницаемости горных пород и усилению нисходящей фильтрации. В связи с этим поверхностный водоток частично перешел в подземный водоток.

По их же данным, процесс радиоактивного загрязнения подземных и поверхностных природных вод на испытательной площадке «Дегелен» СИП продолжается по сей день и имеет относительно стабильный характер [33].

Таким образом, химический и изотопный состав природных вод может оказать влияние и на распределение форм нахождения и на их миграцию в водной среде.

Исследование форм нахождения техногенных радионуклидов в водных объектах СИП

Формы нахождения техногенных радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ исследованы методом

Таблица. Химический состав воды исследованных водоисточников СИП

Table. Chemical composition of water of STS water bodies

Место отбора Sampling point	pH	Минерализация, мг/л TDS, mg/l	POB, мг/л DOC, mg/l	Размерность Unit of measurement	Содержание катионов Cations			Содержание анионов Anions		
					Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
шт. № 177 «Дегелен» № 177 tunnel «Degelen»	8,20	740	<5	мг/л/mg/l	160	70	20	30	240	340
				мг-экв, %/mg-eq, %	58	29	13	7	34	60
шт. № 503 «Дегелен» № 503 tunnel «Degelen»	6,80	520	<5	мг/л/mg/l	25	110	20	8,0	80	320
				мг-экв, %/mg-eq, %	13	68	19	3	16	81
Оз. Телкем-2 Telkem-2 crater lake	8,05	8950	<5	мг/л/mg/l	2400	310	440	3800	400	1800
				мг-экв, %/mg-eq, %	66	10	24	71	4	25
Воронка В-1, «Опытное поле» V-1 crater lake, «Opytnoe pole»	7,20	1960	35	мг/л/mg/l	480	120	80	420	530	600
				мг-экв, %/mg-eq, %	65	17	20	36	26	37

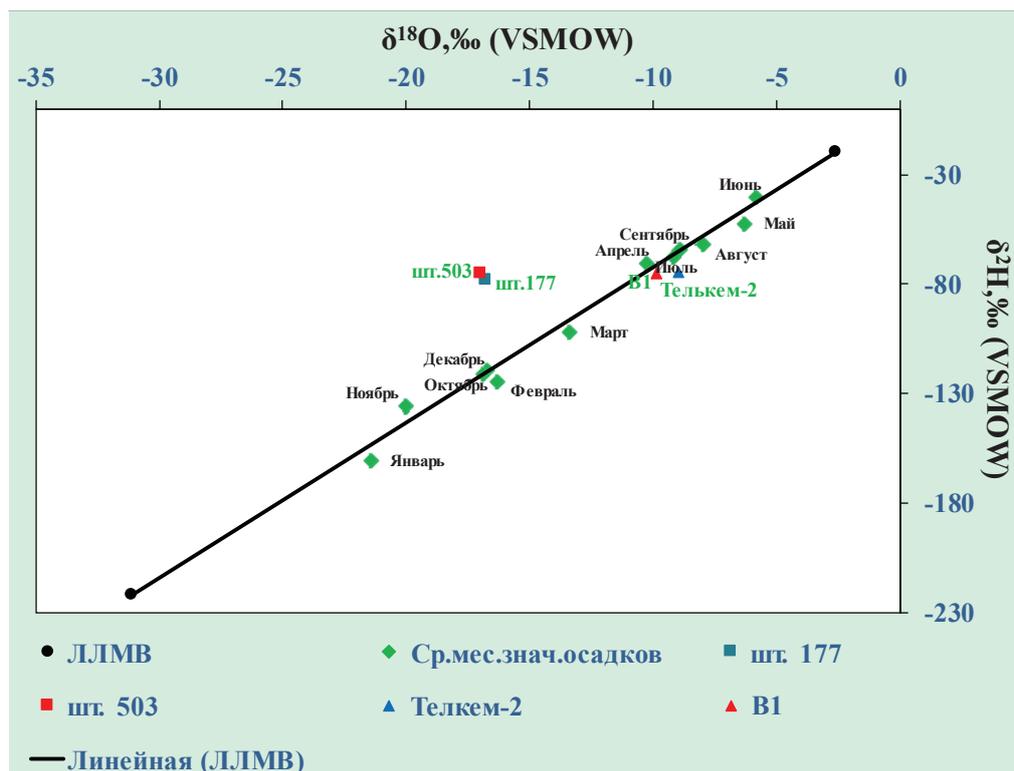


Рис. 3. Отношение стабильных изотопов $^2\text{H}/^{16}\text{O}$ в природных водах Семипалатинского испытательного полигона относительно эталона VSMOW (Венский стандарт среднеокеанической воды). ЛЛМВ – локальная линия метеорных вод, 2016 г.

Fig. 3. Ratio of stable isotopes $^2\text{H}/^{16}\text{O}$ in the natural waters of the Semipalatinsk test site relative to the reference VSMOW (Vienna Standard of Middle Oceanic Water). ЛЛМВ (LLMW) is a local meteoric water line, 2016

каскадного фракционирования на примере четырех водных объектов СИП, представленных двумя водотоками штолен площадки «Дегелен» и искусственными водоемами – озера Телкем-2 и воронки В-1 площадки «Опытное поле».

Исходное содержание ^{137}Cs составило в воде водотока штольни № 503 площадки «Дегелен» составило $(4,9 \pm 1)$ Бк/л, ^{90}Sr – (150 ± 15) Бк/л, $^{239+240}\text{Pu}$ – $(0,70 \pm 0,07)$ Бк/л, и ^{241}Am находились ниже уровня обнаружения.

При изучении исходного содержания радионуклидов в воде водотока штольни № 177 площадки «Дегелен» установлено, что вода после префильтрации (<10000 нм) содержала $(5,0 \pm 0,5)$ Бк/л ^{137}Cs , (680 ± 70) Бк/л ^{90}Sr , и $^{239+240}\text{Pu}$ – $(0,58 \pm 0,06)$ Бк/л, удельная активность ^{241}Am была ниже предела обнаружения.

Удельная активность ^{90}Sr после стадии префильтрации в воде озера Телкем-2 составила (190 ± 20) Бк/л, $^{239+240}\text{Pu}$ – $(0,35 \pm 0,03)$ Бк/л. Содержание таких радионуклидов, как ^{137}Cs и ^{241}Am , было ниже уровня детектируемой активности в фильтрате, однако данные радионуклиды зафиксированы в веществе на фильтрах 10000 и 1000 мкм в суммарном количестве $(2 \pm 0,3) \cdot 10^{-2}$ Бк/л и $(8 \pm 2) \cdot 10^{-3}$ Бк/л соответственно для ^{137}Cs и ^{241}Am при пересчете на объем воды, прошедший через фильтр.

Начальное содержание в воде воронки В-1 радионуклида ^{137}Cs составило $(0,51 \pm 0,05)$ Бк/л, ^{90}Sr –

$(5 \pm 0,5)$ Бк/л, $^{239+240}\text{Pu}$ – $(0,83 \pm 0,08)$ Бк/л. Выявлено, что удельная активность ^{241}Am была ниже предела обнаружения, как и в других изученных водных объектах.

Результаты по фракционированию форм нахождения ^{137}Cs представлены на рис. 4.

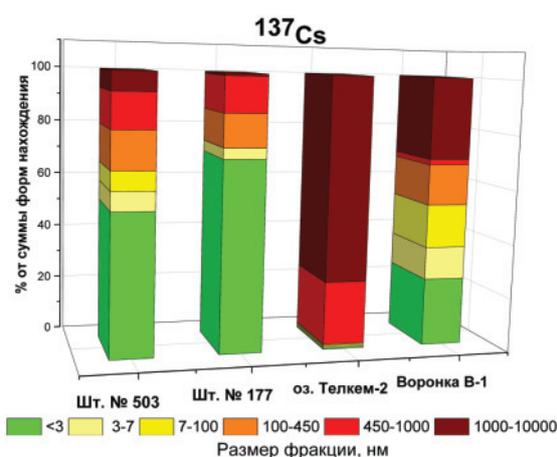


Рис. 4. Распределение форм нахождения ^{137}Cs в водных объектах СИП при каскадной фильтрации

Fig. 4. Distribution of ^{137}Cs speciation in water bodies of STS by cascade filtration

Так, удельная активность ^{137}Cs в воде водотока штольни № 503 площадки «Дегелен» после всего

каскада фильтров сохранялась на уровне $3,6 \pm 0,4$ Бк/л (72 % от исходного содержания). При этом на фильтрах, задерживающих частицы с размером, характерным для коллоидов (от 3 до 450 нм), не было выявлено значимого уменьшения количества ^{137}Cs . В воде озера Телкем-2 радиоцезий находился преимущественно во фракциях 450–10000 нм, что характерно для взвешенных веществ.

Распределение форм нахождения данного радиоактивного элемента в воде воронки В-1 площадки «Опытное поле» показало, что преобладающими были фракции 1000–10000 нм и <3 нм (31 и 25 % соответственно), на долю коллоидных фракций приходилось от 12 до 16 % от суммы всех форм нахождения. Нахождение радиоцезия в коллоидах можно объяснить более высокой концентрацией органического вещества и коллоидных веществ из-за условий гидрологического режима водоемов. Содержание данного радионуклида снижалось по мере прохождения воды через каскад фильтров (рис. 5).

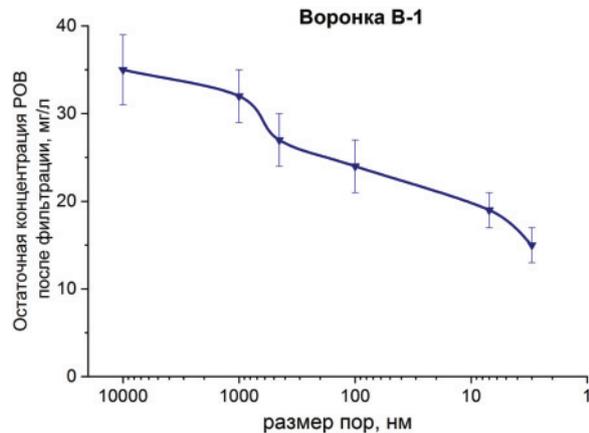


Рис. 5. Распределение остаточной концентрации органического вещества воронки В-1 площадки «Опытное поле» при каскадном фильтровании

Fig. 5. Cut-off of dissolved organic carbon (DOC) in water of V-1 crater lake of «Opytnoe pole» with cascade filtration

Так, согласно представленным на рис. 5 данным, наибольшее снижение концентрации органического вещества было отмечено после фильтрации через мембраны с диаметром пор 450 и 7 нм, что соответствует отсечению псевдоколлоидов и крупных коллоидов.

По данным [35], в воде рек и водохранилищ Беларуси до 70 % ^{137}Cs приходится на растворенные формы, а количество данного радионуклида во взвешях изменчиво и в значительной степени зависит от сезона, типа водного объекта (водохранилище или река), количества органического вещества и глинистых частиц во взвешенном состоянии.

На рис. 6 приведены данные по распределению форм нахождения ^{90}Sr в водных объектах СИП.

Активность ^{90}Sr при каскадной фильтрации воды озера Телкем-2 снижалась от 190 ± 20 до 160 ± 20 Бк/л. С учетом погрешности измерений, которая не перекрывает изменения уровня оста-

точной удельной активности после каждой стадии фильтрации, можно считать, что основной формой миграции ^{90}Sr в воде озера Телкем-2 являются растворенные соединения.

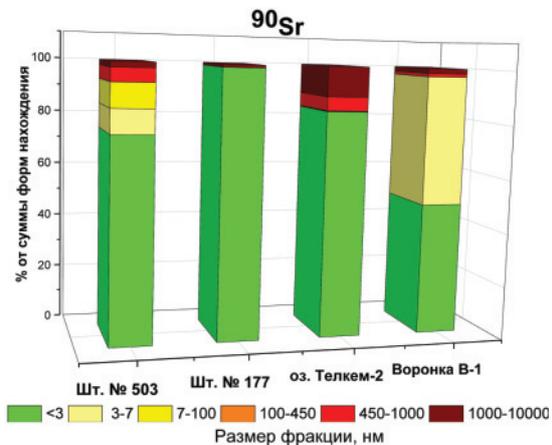


Рис. 6. Распределение форм нахождения ^{90}Sr в водных объектах Семипалатинского испытательного полигона при каскадной фильтрации

Fig. 6. Distribution of ^{90}Sr speciation in water bodies of STS by cascade filtration

При ступенчатой фильтрации воды водотока штольни № 503 через каскад фильтров в диапазоне от 10000 нм до 100 нм удельная активность ^{90}Sr сохранялась на исходном уровне. Далее по каскаду после фильтра через мембрану 7 нм (100 кДа) активность данного радионуклида снизилась на 13 %, и после фильтра с отсецием номинальной молекулярной массы 10 кДа – еще на 13 %. Тем не менее, преобладающей формой нахождения для ^{90}Sr в воде водотока штольни 503 осталась растворенная (75 %), на долю взвешенных и коллоидных форм приходилось порядка 25 % в сумме.

В воде воронки В-1 было отмечено распределение ^{90}Sr между растворенной и коллоидной (3–7 нм). Такая особенность водного объекта также может быть связана с наличием в воде растворенных органических веществ.

Отдельными авторами [36] отмечается способность радиостронция связываться с взвешенным веществом природных вод в количестве до 15 % от удельной активности в растворенной форме.

Данные по формам нахождения $^{239+240}\text{Pu}$ в водных объектах СИП представлены на рис. 7.

Результаты радионуклидного анализа изотопов $^{239+240}\text{Pu}$ в воде водотока штольни № 503 показали, что его удельная активность при каскадной фильтрации уменьшилась примерно на порядок. Остаточная активность $^{239+240}\text{Pu}$ после финальной стадии фильтрации составила $(6,2 \pm 0,6) \cdot 10^{-2}$ Бк/л. При этом распределение по формам нахождения было следующим: на фильтре 1000 нм было задержано 17 % от суммы форм нахождения, 450 нм – 6 %, 100 нм – 21 %, 7 нм – 43 % и 3 нм – 1 %. Таким образом, установлено, что данный радионуклид в воде водотока штольни 503 способен находиться в форме взвесей, коллоидов разного размера и оставаться в растворенной форме.

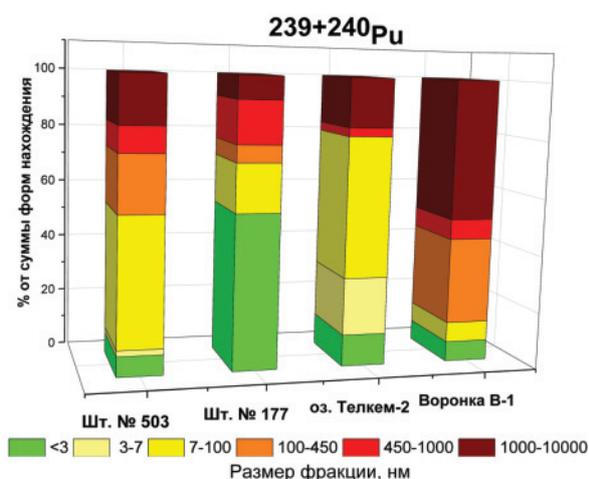


Рис. 7. Распределение форм нахождения $^{239+240}\text{Pu}$ в водных объектах Семипалатинского испытательного полигона при каскадной фильтрации

Fig. 7. Distribution of $^{239+240}\text{Pu}$ speciation in water bodies of STS by cascade filtration

При изучении форм нахождения $^{239+240}\text{Pu}$ в воде водотока штольни № 177 также наблюдалось распределение активности по всему каскаду фильтров, однако в указанном водоисточнике порядка 50 % рассматриваемого радиоактивного элемента находилось в растворенной форме.

Величина удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в воде озера Телкем-2 снизилась в процессе каскадного фракционирования в 10 раз с $(0,35 \pm 0,03)$ до $(4 \pm 0,4) \cdot 10^{-2}$ Бк/л, при этом самое значительное уменьшение активности наблюдалось после фильтрации через 1000 нм и 7 нм (в 1,5 и 3,2 раза от содержания после предфильтрации соответственно). Таким образом, в данном объекте $^{239+240}\text{Pu}$ находился во фракции 1000–10000 нм – 31 % от суммы форм нахождения, коллоидов размером 7–100 нм – 37 %, коллоидов размером 3–7 нм (10–100 кДа) – 20 %, и в растворенной форме – порядка 11 %.

Удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в процессе фракционирования форм нахождения в воде воронки В-1 площадки «Опытное поле» снизилась от 0,83 до 0,06 Бк/л, примерно на порядок, как и для оз. Телкем-2 и воды водотока штольни 503. Преобладающими формами нахождения были крупные взвеси (порядка 50 % от суммы форм нахождения), псевдоколлоиды (30 %), а также коллоиды различных размеров.

В литературе отмечалось [19, 37], что для поверхностных вод порядка 70 % $^{239+240}\text{Pu}$ может присутствовать в форме растворенных комплексов и не связано с

коллоидными частицами, в отличие от грунтовых вод, где более 90 % $^{239+240}\text{Pu}$ было связано с коллоидами.

В то же время данный радиоактивный элемент обладает низкой кинетикой растворимости в случае если источник его происхождения – «горячие частицы». Из-за аналитической сложности часто не удается зафиксировать частицы, содержащие плутоний выше предела обнаружения методами микроанализа, например методом сканирующей электронной микроскопии, однако при их растворении (либо растворении фильтра со взвешенным веществом, выделенных из природных вод) $^{239+240}\text{Pu}$ и другие трансурановые радионуклиды фиксируются спектрометрическими методами либо методами ИСП-МС, как это было показано в [38, 39] и установлено в данной работе.

Полученные результаты показывают, что распределение форм нахождения данного радионуклида индивидуально для каждого объекта и не зависит от типа водоисточника. Достоверного влияния химического состава изученных водоисточников на формы нахождения $^{239+240}\text{Pu}$ не выявлено.

Заключение

Было изучено распределение радионуклидов и формы их нахождения методом каскадного фракционирования в водных объектах Семипалатинского испытательного полигона. Обобщая результаты по определению форм нахождения радионуклидов в водных объектах СИП, выявлено, что для ^{90}Sr характерна растворенная форма нахождения, для $^{239+240}\text{Pu}$ свойственно нахождение в различных формах, с преобладанием коллоидных и растворенных, при этом соотношение форм нахождения зависит от изучаемого объекта. Формами нахождения ^{137}Cs в водных объектах СИП являются взвешенные вещества, псевдоколлоиды, а также растворенное вещество. Для установления достоверного влияния физико-химических характеристик водных объектов, их типа и водного режима на распределение форм нахождения радиоактивных элементов в изученных водных объектах требуются дополнительные исследования.

Исследование частично профинансировано за счет средств программно-целевого финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан (номер проекта 0122/ПЦФ-14), гранта Министерства образования и науки Российской Федерации (госзадание № 5.10015.2017/5.2/ДААД).

Автор выражает признательность коллективу Филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» НЯЦ РК за организацию полевых работ и проведение лабораторных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изучение современного состояния и последствий деятельности объектов атомной энергетики Семипалатинского полигона на окружающую среду: отчет о НИР за 2009–2011 гг. (заключит.) / рук. С.Н. Лукашенко. № ГР 0109РК01414. – 216 с.
2. Калмыков С.Н. Роль коллоидных частиц в миграции актинидов с подземными водами: автореф. дис... д-ра наук. – М., 2008. – 49 с.

3. Программа целевого финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан 0122/ПЦФ-14. Разработка новых функциональных материалов на основе полиэтилентерефталатных и поликарбонатных трековых мембран, проведение фундаментальных и опытно-конструкторских исследований по применению новых типов и видов мембран: отчет о НИР за 2015 г. (промежут.) / рук. К.К. Кадыржанов. № ГР 0115РК02950. – 189 с.

4. Novikov A.P. Migration and concentration of artificial radionuclides in environmental objects // *Geochemistry Int.* – 2010. – V. 48 (13). – P. 1263–1387.
5. Turner N.B., Ryan J.N., Saiers J.E. Effect of desorption kinetics on colloid-facilitated transport of contaminants: Cesium, strontium, and illite colloids // *Water Resour. Res.* – 2006. – V. 42. – № 12. – P. 1–17.
6. Aarkrog A. Input of anthropogenic radionuclides into the World Ocean // *Deep. Res. P. II Top. Stud. Oceanogr.* – 2003. – V. 50. – № 17–21. – P. 2597–2606.
7. Lelieveld J., Kunkel D., Lawrence M.G. Global risk of radioactive fallout after major nuclear reactor accidents // *Atmos. Chem. Phys.* – 2012. – V. 12. – № 9. – P. 4245–4258.
8. Castrillejo M. et al. Reassessment of ^{90}Sr , ^{137}Cs , and ^{134}Cs in the Coast of Japan Derived from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Accident // *Environ. Sci. Technol.* – 2016. – V. 50. – № 1. – P. 173–180.
9. Smith J.N. et al. Recent Transport History of Fukushima Radioactivity in the Northeast Pacific Ocean // *Environ. Sci. Technol.* – 2017. – V. 51. – № 18. – P. 10494–10502.
10. Novikov A.P. et al. Colloid Transport of Plutonium in the Far-Field of the Mayak Production Association, Russia // *Science.* – 2006. – V. 314. – № 5799. – P. 638–641.
11. Zachara J.M. et al. Sorption of Cs^+ to micaceous subsurface sediments from the Hanford site, USA // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 2002. – V. 66. – № 2. – P. 193–211.
12. Папина Т.С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода – взвешенное вещество – донные отложения речных экосистем / Аналитический обзор (монография). – Новосибирск: ИВЭП СО РАН, 2001. – 58 с.
13. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments: Technical Reports Series. – Vienna: IAEA, 2010. – № 472. – 76 p.
14. Salbu B. et al. Challenges associated with the behaviour of radioactive particles in the environment // *J. Environ. Radioact.* Elsevier Ltd. – 2018. – V. 186. – P. 101–115.
15. Speciation, size fractionation and transport of trace elements in the continuum soil water–mire–humic lake–river–large oligotrophic lake of a Subarctic watershed / S. Ilina, S. Lapitskiy, Y. Alekhin et al. // *Aquatic Geochemistry.* – 2016. – V. 22. – P. 65–95.
16. Ure A.M., Davidson C.M. Chemical Speciation in the Environment. – Glasgow: Blackwell Science, 2002. – 452 p.
17. Durrant C.B. et al. Cesium sorption reversibility and kinetics on illite, montmorillonite, and kaolinite // *Sci. Total Environ.* – 2018. – V. 610–611. – P. 511–520.
18. Buddemeier R.W., Hunt J.R. Transport of colloidal contaminants in groundwater: Radionuclide migration at the Nevada test site // *Appl. Geochemistry.* – 1988. – V. 3. – P. 535–548.
19. Поведение плутония в окружающей среде / А.Ю. Романчук, С.Н. Калмыков, А. Керстинг, М. Заварин // *Успехи химии.* – 2016. – Т. 85. – С. 995–1010.
20. Buck E.C., Bates J.K. Microanalysis of colloids and suspended particles from nuclear waste glass alteration // *Applied Geochemistry.* – 1999. – V. 14 (5). – P. 635–653.
21. Xie J. et al. Colloid-associated plutonium transport in the vadose zone sediments at Lop Nor // *J. Environ. Radioact.* – 2013. – V. 116. – P. 76–83.
22. Lind O.C. et al. Transport of low $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ atom ratio plutonium-species in the Ob and Yenisey Rivers to the Kara Sea // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2006. – V. 251. – № 1–2. – P. 33–43.
23. Ryan J.N., Elimelech M. Colloid mobilization and transport in groundwater // *Coll. Surf.* – 1996. – V. 107. – P. 1–56.
24. Smith P.A., Degueldre C. Colloid-facilitated transport of radionuclides through fractured media // *J. of Contaminant Hydrology.* – 1993. – V. 13. – P. 143–166.
25. Colloid transport of radionuclides: Yucca Mountain performance assessment / K.A. Traexler, S. Utsunomiya, A.B. Kersting, R.C. Ewing // *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* – 2004. – V. 807. – P. 653–658.
26. Kersting A.B. et al. Migration of plutonium in ground water at the Nevada Test Site // *Nature.* – 1999. – V. 397 (6714). – P. 56–59.
27. Di Bonito M., Lofts S., Groenenberg J.E. Models of Geochemical Speciation: Structure and Applications // *Environmental Geochemistry. Chapter 11.* 2nd ed. – Berlin: Elsevier, 2018. – P. 237–305.
28. Vintró L. et al. Americium, plutonium and uranium contamination and speciation in well waters, streams and atomic lakes in the Sarzhak region of the Semipalatinsk Nuclear Test Site, Kazakhstan // *J. Environ. Radioact.* – 2009. – V. 100. – № 4. – P. 308–314.
29. Priest N. et al. Investigation of Radiological Situation in the Sarzhak Region of the Semipalatinsk Nuclear Test Site. – Final report, 2003. – NATO Sfp-9760046(99).
30. Поляков Е.В., Егоров Ю.В. Современные методы определения физико-химического состояния микроэлементов в природных водах // *Успехи химии.* – 2003. – Т. 72. – № 11. – С. 1103–1114.
31. Aidarkhanov A.O. et al. Mechanisms for surface contamination of soils and bottom sediments in the Shagan River zone within former Semipalatinsk Nuclear Test Site // *J. of Environ. Radioact.* – 2013. – V. 124. – P. 163–170.
32. Паницкий А.В., Лукашенко С.Н., Магашева Р.Ю. Характерные особенности радиоактивного загрязнения компонентов природной среды экосистем водотоков штолен горного массива Дегелен // *Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстан.* – Павлодар: Дом печати, 2010. – Вып. 2. – С. 57–102.
33. Subbotin S.B., Dubasov Y.V. Radioactive contamination of water of the Degelen mountain massif // *Radiochemistry.* – 2013. – V. 55. – № 6. – P. 647–654.
34. Osmonics Pure Water Handbook. 2nd ed. – Minnetonka: Osmonics Inc., 1997. – 149 p.
35. Научное решение чернобыльских проблем: итоги 10-летия (основные итоги научного обеспечения реализации государственных программ Республики Беларусь по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 1996–2000 и 2001–2005 гг.). – Гомель: РНИУП «Институт радиологии», 2006. – 103 с.
36. Руденко Л.И., Скляр В.Я., Хан В.Е. Изучение фазового распределения и форм нахождения радионуклидов в воде из внутренних помещений объекта «Укрытие» и в грунтовых водах промплощадки методом ультрафильтрации // *Доп. НАН Украины.* – 1998. – № 6. – С. 153–157.
37. Linnik V.G. et al. Radioactive contamination of the Balchug (Upper Yenisey) floodplain, Russia in relation to sedimentation processes and geomorphology // *Sci. Total Environ.* – 2005. – V. 339. – P. 233–251.
38. Bolsunovsky A. et al. Unique diversity of radioactive particles found in the Yenisei River floodplain // *Nature: Sci. Rep.* – 2017. – V. 7. – № 1. – P. 1–10.
39. Radioactive Particles in the Environment: Sources, Particle Characterization and Analytical Techniques // IAEA TECDOC. – No. 1663. – Vienna. – 2011. – 90 p.

Поступила 08.02.2018 г.

Информация об авторах

Торопов А.С., аспирант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.424.6:504.4:628.31.034.2(574.41)

FRACTIONATION OF TECHNOGENIC RADIONUCLIDES SPECIES IN WATER BODIES OF SEMIPALATINSK TEST SITE

Andrey S. Toropov,
torop990@gmail.com

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

The relevance of the study is defined by the ability of technogenic radionuclides contained in significant quantities in surface water bodies of the Semipalatinsk test site, to move beyond the nuclear test sites. This ability is determined by the speciations of radioactive elements. The issue of migration and influence of species of technogenic radionuclides in water bodies has not been studied enough to predict the behavior of radioactive elements on a long-term basis.

The aim of the work is to study the speciation of radionuclides in the water bodies of the Semipalatinsk test site.

Methods. Distribution of species of radioactive elements was studied using the sequential cascade fractionation. Water pH was defined potentiometrically using Anion-4100 device. The components of chemical composition of natural water and total dissolved solids were determined in accordance with All Union State standard 26449.1–85. The content of dissolved organic matter was identified by the dichromatic oxidation method with a measurement on a PE-5300VI spectrophotometer. The content of radioactive isotopes was determined by radiochemical separation methods with the preparation of a counting sample for alpha spectrometry of $^{239+240}\text{Pu}$, liquid-scintillation beta spectrometry of ^{90}Sr , and highly sensitive gamma spectrometry with a well type high-purity germanium semiconductor detector after preconcentration for ^{137}Cs and ^{241}Am .

Results. The cascade fractionation method using a set of membranes with decreasing pore size is suitable for separation of suspended, pseudocolloidal, colloidal and dissolved species in natural waters. The author has obtained the data of chemical and isotopic composition of individual water bodies of the Semipalatinsk test site as well as content and speciations of radionuclides. It was found that ^{137}Cs in water migrates in colloid and dissolved forms, the predominant species of ^{90}Sr is dissolved, fractionation of $^{239+240}\text{Pu}$ was specific for each water body. The water of the waterstream outflowing from tunnel No. 177 is characterized by the predominance of dissolved form for all studied radionuclides.

Key words:

Speciation, fractionation, natural waters, radioactive elements, technogenic radionuclides, suspended matters, pseudocolloids, colloids

The research was partially funded due to the target financing of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (project no. 0122/ПЦФ-14), grant of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state task no. 5.10015.2017/ДААД).

The author appreciates the team of the Branch «Institute of radiation safety and ecology» NNC RK for field works and laboratory investigations.

REFERENCES

1. *Izuchenie sovremennogo sostoyaniya i posledstviy deyatelnosti ob'ektov atomnoy energetiki Semipalatinskogo poligona na okruzhayushchuyu sredy* [Study of the current state and consequences of the activities of nuclear power facilities of the Semipalatinsk test site on the environment]. Final report on R&D 2009–2011. Ed. by S.N. Lukashenko. No. NR 0109PK01414. 216 p.
2. Kalmykov S.N. *Rol kolloidnykh chastits v migratsii aktinidov s podzemnymi vodami*. Avtoreferat Diss. Dokt. nauk [The role of colloidal particles in migration of actinides with groundwater. Dr. Diss. Abstract]. Moscow, 2008. 49 p.
3. *Programma tselevogo finansirovaniya Ministerstva obrazovaniya i nauki Respubliki Kazakhstan 0122/PCF-15. Razrabotka novykh funktsionalnykh materialov na osnove polietilentereftalatnykh i polikarbonatnykh trekovykh membran, provedenie fundamentalnykh i opytно-konstruktorskiikh issledovaniy po primeneniyu novykh tipov i vidov membran* [Targeted financing program of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan 0122/TFP-15. Development of new functional materials based on polyethylene terephthalate and polycarbonate track membranes, conducting fundamental and experimental design studies on the use of new types and types of membranes]. Report on R&D for 2015. Ed. by K.K. Kadyrzhanov. No. NR 0115RK02950. 189 p.
4. Novikov A.P. Migration and concentration of artificial radionuclides in environmental objects. *Geochemistry Int.*, 2010, vol. 48 (13), pp. 1263–1387.
5. Turner N.B., Ryan J.N., Saiers J.E. Effect of desorption kinetics on colloid-facilitated transport of contaminants: Cesium, strontium, and illite colloids. *Water Resour. Res.*, 2006, vol. 42, no. 12, pp. 1–17.
6. Aarkrog A. Input of anthropogenic radionuclides into the World Ocean. *Deep. Res. P. II Top. Stud. Oceanogr.*, 2003, vol. 50, no. 17–21, pp. 2597–2606.
7. Lielieveld J., Kunkel D., Lawrence M.G. Global risk of radioactive fallout after major nuclear reactor accidents. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, vol. 12, no. 9, pp. 4245–4258.
8. Castrillejo M. Reassessment of ^{90}Sr , ^{137}Cs and ^{134}Cs in the Coast off Japan Derived from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Accident. *Environ. Sci. Technol.*, 2016, vol. 50, no. 1, pp. 173–180.
9. Smith J.N. Recent Transport History of Fukushima Radioactivity in the Northeast Pacific Ocean. *Environ. Sci. Technol.*, 2017, vol. 51, no. 18, pp. 10494–10502.
10. Novikov A.P. Colloid Transport of Plutonium in the Far-Field of the Mayak Production Association, Russia. *Science*, 2006, vol. 314, no. 5799, pp. 638–641.
11. Zachara J.M. Sorption of Cs+ to micaceous subsurface sediments from the Hanford site, USA. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 2002, vol. 66, no. 2, pp. 193–211.
12. Papina T.S. *Transport i osobennosti raspredeleniya tyazhelykh metallov v ryadu: voda –vzveshennoe veshchestvo – donnye otlozheniya rechnykh ekosistem* [Transport and features of the distribution of heavy metals in the series: water – suspended mat-

- ter – bottom sediments of river ecosystems. Analytical review.]. Novosibirsk, SB RAS Press, 2001. 58 p.
13. *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments: Technical Reports Series*. Vienna, IAEA, 2010. No. 472. 76 p.
 14. Salbu B. Challenges associated with the behaviour of radioactive particles in the environment. *J. Environ. Radioact.*, 2018, vol. 186, pp. 101–115.
 15. Ilina S., Lapitskiy S., Alekhin Y. Speciation, size fractionation and transport of trace elements in the continuum soil water–microhumic lake–river–large oligotrophic lake of a Subarctic watershed. *Aquatic Geochemistry*, 2016, vol. 22, pp. 65–95.
 16. Ure A.M., Davidson C.M. *Chemical Speciation in the Environment*. Glasgow, Blackwell Science, 2002. 452 p.
 17. Durrant C.B. Cesium sorption reversibility and kinetics on illite, montmorillonite, and kaolinite. *Sci. Total Environ.*, 2018, vol. 610–611, pp. 511–520.
 18. Buddemeier R.W., Hunt J.R. Transport of colloidal contaminants in groundwater: Radionuclide migration at the Nevada test site. *Appl. Geochemistry*, 1988, vol. 3, pp. 535–548.
 19. Romanchuk A.Yu., Kalmykov S.N., Kersting A.B., Zavarin M. Behavior of plutonium in the environment. *Russ. Chem. Rev.*, 2016, vol. 85, no. 9, pp. 995–1010. In Rus.
 20. Buck E.C., Bates J.K., Microanalysis of colloids and suspended particles from nuclear waste glass alteration. *Applied Geochemistry*, 1999, vol. 14 (5), pp. 635–653.
 21. Xie J. Colloid-associated plutonium transport in the vadose zone sediments at Lop Nor. *J. Environ. Radioact.*, 2013, vol. 116, pp. 76–83.
 22. Lind O.C. Transport of low $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ atom ratio plutonium-species in the Ob and Yenisey Rivers to the Kara Sea. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, vol. 251, no. 1–2, pp. 33–43.
 23. Ryan J.N., Elimelech M. Colloid mobilization and transport in groundwater. *Coll. Surf.*, 1996, vol. 107, pp. 1–56.
 24. Smith P.A., Degueldre C. Colloid-facilitated transport of radionuclides through fractured media. *J. of Contaminant Hydrology*, 1993, vol. 13, pp. 143–166.
 25. Traexler K.A., Utsunomiya S., Kersting A.B., Ewing R.C. Colloid transport of radionuclides: Yucca Mountain performance assessment. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 2004, vol. 807, pp. 653–658.
 26. Kersting A.B. Migration of plutonium in ground water at the Nevada Test Site. *Nature*, 1999, vol. 397 (6714), pp. 56–59.
 27. Di Bonito M., Lofts S., Groenenberg J.E. Models of Geochemical Speciation: Structure and Applications. *Environmental Geochemistry*, Ch. 11. 2nd ed. Berlin, Elsevier B.V., 2018. pp. 237–305.
 28. Vintró L. Americium, plutonium and uranium contamination and speciation in well waters, streams and atomic lakes in the Sarzhai region of the Semipalatinsk Nuclear Test Site, Kazakhstan. *J. Environ. Radioact.*, 2009, vol. 100, no. 4, pp. 308–314.
 29. Priest N. *Investigation of Radiological Situation in the Sarzhai Region of the Semipalatinsk Nuclear Test Site*. Final report, 2003. NATO SfP-9760046(99).
 30. Polyakov E.V., Egorov Yu.V. Sovremennyye metody opredeleniya fiziko-khimicheskogo sostoyaniya mikroelementov v prirodnykh vodakh [Modern methods for determining physico-chemical state of microelements in natural waters]. *Uspekhi khimii*, 2003, vol. 72, no. 11, pp. 1103–1114.
 31. Aidarkhanov A.O. Mechanisms for surface contamination of soils and bottom sediments in the Shagan River zone within former Semipalatinsk Nuclear Test Site. *J. of Environ. Radioact.*, 2013, vol. 124, pp. 163–170.
 32. Panitskiy A.V., Lukashenko S.N., Magasheva R.Yu. Kharakternye osobennosti radioaktivnogo zagryazneniya komponentov prirodnoy sredy ekosistem vodotokov shtolen gornogo massiva Degelen [Peculiarities of radioactive contamination of environmental components of tunnel outflowing waterstreams ecosystems of massif Delegen]. *Aktualnye voprosy radioekologii Kazakhstana* [Current issues of radioecology of Kazakhstan]. Pavlodar, Dom pechati Publ., 2010. Iss. 2, pp. 57–102.
 33. Subbotin S.B., Dubasov Y.V. Radioactive contamination of water of the Degelen mountain massif. *Radiochemistry*, 2013, vol. 55, no. 6, pp. 647–654.
 34. *Osmonics Pure Water Handbook*. 2nd ed. Minnetonka, Osmonics Inc., 1997. 149 p.
 35. *Nauchnoe reshenie chernobylskikh problem: itogi 10-letiya (osnovnye itogi nauchnogo obespecheniya realizatsii gosudarstvennykh programm Respubliki Belarus po preodoleniyu posledstvy katastrofy na Chernobylskoy AES na 1996–2000 i 2001–2005 gg.)* [Scientific solution of the Chernobyl problems: the results of the 10th anniversary (the main results of scientific support for the implementation of the state programs of the Republic of Belarus for overcoming the consequences of the Chernobyl catastrophe for 1996–2000 and 2001–2005)]. Gomel, RNIP «Institute of Radiology» Publ., 2006. 103 p.
 36. Rudenko L.I., Sklyar V.Ya., Khan V.E. Izuchenie fazovogo raspredeleniya i form nakhozhdeniya radionuklidov v vode iz vnutrennikh pomescheny obekta «Ukrytie» i v gruntovykh vodakh promplohchadki metodom ultrafiltratsii [Study of phase distribution and speciations of radionuclides in water from the interior of the «Ukrytie» and the industrial site in groundwater by ultrafiltration]. *Rep. NAS of Ukraine*, 1998, no. 6, pp. 153–157.
 37. Linnik V.G. Radioactive contamination of the Balchug (Upper Yenisey) floodplain, Russia in relation to sedimentation processes and geomorphology. *Sci. Total Environ.*, 2005, vol. 339, pp. 233–251.
 38. Bolsunovskiy A. Unique diversity of radioactive particles found in the Yenisei River floodplain. *Nature: Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 1–10.
 39. *Radioactive Particles in the Environment: Sources, Particle Characterization and Analytical Techniques*. IAEA TECDOC., No. 1663, Vienna, 2011, 90 p.

Received: 8 February 2018.

Information about the authors

Andrey S. Toropov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 661.333.013:628.54+658.567.5

СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНЫХ СВОЙСТВ ШЛАМОВ СОДОВОГО ПРОИЗВОДСТВА С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ИХ УТИЛИЗАЦИЕЙ

Калинина Елена Васильевна¹,
kalininaelena1@rambler.ru

Рудакова Лариса Васильевна¹,
larisa@eco.pstu.ac.ru

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью обоснования способов снижения опасных для окружающей среды свойств шламов содового производства и способов их последующей утилизации.

Цель работы: обоснование возможности снижения опасных для окружающей среды свойств шламов содового производства с последующей их утилизацией.

Методы. Для снижения опасных для окружающей среды свойств шламов содового производства предложено обезвоживание исходной дистиллерной жидкости методами отстаивания, фильтрования и центрифугирования. Биотестирование водных вытяжек проводили на тест-объектах из разных систематических групп (*Ceriodaphnia affinis*, *Daphnia magna* Straus, *Scenedesmus guadricauda* и *Paramecium caudatum*). Физико-химические свойства шламов содового производства и дистиллерной жидкости определяли по установленным методикам. Фитотоксичность материала для биологической рекультивации исследовали методом проростков с использованием семян овса и гороха. Физико-химические свойства, плавящую способность и коррозионную активность образцов жидких противогололедных материалов определяли по «Методике испытания противогололедных материалов». Физико-механические свойства шламов содового производства определяли по требованиям ГОСТ Р 52129–2003 «Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей». Для горячей асфальтобетонной смеси с содержанием шлама содового производства определяли эксплуатационные показатели согласно требованиям ГОСТ 9128–84* «Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия».

Результаты исследования позволили установить, что шламы содового производства обладают опасными для окружающей природной среды свойствами, которые могут быть устранены путем изменения способа обезвоживания. Наименее опасной для окружающей природной среды является мелкодисперсная фракция шламов (<0,5 мм; pH=8,3), выделенная при центрифугировании, которую можно использовать совместно с избыточным активным илом биологических очистных сооружений в составе материала для биологической рекультивации. Концентрированную дистиллерную жидкость можно использовать в качестве противогололедного материала. Обезвоженный методом отстаивания шлам содового производства по физико-механическим свойствам подобен минеральному порошку марки МП-1 и может быть использован для его замены в производстве горячих асфальтобетонных смесей.

Ключевые слова:

Шлам содового производства, дистиллерная жидкость, «Белое море», жидкий противогололедный материал, материал для биологической рекультивации, минеральный порошок, асфальтобетонная смесь.

Введение

Одним из важнейших продуктов неорганического синтеза является кальцинированная сода, производимая в России преимущественно аммиачным способом (около 70 %). Крупнейшими российскими производителями кальцинированной соды являются АО «Башкирская содовая компания» (г. Стерлитамак) и АО «Березниковский содовый завод» (г. Березники). Наиболее существенным негативным воздействием на окружающую среду производства кальцинированной соды аммиачным способом является образование дистиллерной жидкости, состоящей из твердой и жидкой фазы. Разделение на жидкую и твердую фазу традиционно осуществляется методом отстаивания в шламонакопителях, при этом образующийся шлам складывается в шламонакопителе, а высокоминерализованная дистиллерная жидкость сбрасывается в поверхностный водный объект. Шламонакопители называют «Белыми морями», т. к. поверхность накопителя приобретает белый цвет за счет цвета шлама содового производства.

Шламонакопитель АО «Башкирская содовая компания» расположен на берегу р. Белая (рис. 1), состоит из 10 отсеков, занимает площадь около 474 га, содержит более 20 млн т шламов [1]. Шламонакопитель АО «Березниковский содовый завод» расположен на берегу р. Кама (рис. 2), включает действующую карту площадью 155 га (степень заполнения более 95 %) и закрытую карту площадью около 89 га, ориентировочный накопленный объем шламов около 20 млн т [2, 3].

Постановка задачи

Анализ Европейского опыта обращения с дистиллерной жидкостью показал, что ее сбрасывают в водные объекты, преимущественно в море, через рассеивающие водовыпуски для предотвращения наносов взвешенных веществ [6]. Снижение содержания тяжелых металлов достигается путем снижения их содержания в исходном сырье. В случаях, когда сброс осуществляется в пресноводные объекты, минимизация негативного влияния на окружающую среду достигается путем:

- выбора исходного сырья с минимальным содержанием тяжелых металлов и других опасных компонентов;
- осаждения взвешенных веществ в отстойниках и рассеивания при сбросе жидкой фазы;
- осаждения взвешенных веществ при подземном захоронении и рассеивания при сбросе жидкой фазы.

В результате накопления больших объемов шламов содового производства (ШСП) и высокой степени заполнения существующих шламонакопителей вопрос утилизации шламов содового производства является актуальным. В настоящее время основным способом обращения со шламами является складирование в шламонакопителях, занимающих

значительные территории и являющихся источниками загрязнения объектов окружающей среды.

Анализ европейского опыта утилизации шламов содового производства позволил выявить основные приемы обращения с ними [6]:

- промывка водой для снижения содержания растворимых солей;
- сушка полученных материалов до приемлемого уровня остаточной влажности, что облегчает транспортировку и повторное использование.

Европейские исследования по возможности использования шламов содового производства в составе строительных материалов показали, что их использование ограничено: наличием остаточных хлоридов, малым размером частиц, тиксотропны-



Рис. 1. Шламонакопитель АО «Башкирская содовая компания» [4]

Fig. 1. Sludge accumulator of JSC «Bashkir soda company»



Рис. 2. Шламонакопитель АО «Березниковский содовый завод» [5]

Fig. 2. Sludge accumulator of JSC «Berezniki soda plant»

ми свойствами материала и изменчивостью его состава. К настоящему времени накоплен практический европейский опыт по использованию шламов в качестве известковых удобрений для почвы, производства цемента, гипса и наполнителей. Но эти направления не получили развития в промышленном масштабе.

Российский опыт обращения с отходами, в том числе в использовании ресурсного потенциала отходов производства, отстает от европейского [7]. Основными причинами этого являются: относительно низкие цены на первичное природное сырье; неоднородность состава и свойств промышленных отходов; необходимость предварительной обработки отходов; приемлемый уровень экологических платежей для промышленных предприятий за размещение отходов.

Шламы содового производства по химическому и фазовому составу близки к первичным природным материалам [3, 8, 9]. Известны отечественные примеры использования шламов содового производства и дистиллерной жидкости в качестве:

- белитового вяжущего в производстве силикатного кирпича [1];
- известьсодержащего вяжущего и ячеистого бетона на его основе [1, 10, 11];
- компонента тампонажного спеццемента [1, 12];
- сырья для получения хлоридов кальция и аммония [1];
- ускорителя твердения асбестоцементных изделий [1];
- мелиоранта в сельском хозяйстве [1];
- реагента для нейтрализации кислых шахтных вод [13];
- материала для покрытия грунтовых дорог [3].

Представленные направления утилизации шламов содового производства и дистиллерной жидкости в настоящее время практически не применяются. Необходимость утилизации больших объемов накопленных шламов содового производства (более 40 млн т.) обосновывает актуальность выполнения работ по снижению опасных для окружающей среды свойств шламов содового производства и расширению способов их утилизации.

Задача утилизации отходов с выделением полезных фракций, направляемых для последующего использования, является актуальной для исследователей из разных стран [14]. В связи с использованием больших объемов минерального сырья строительная отрасль является перспективным потребителем вторичных ресурсов стабильного качества [15].

Объекты и методы исследования

Объектами исследования были выбраны шламы содового производства на различных этапах жизненного цикла и обезвоженные различными способами, дистиллерная жидкость (г. Березники и г. Стерлитамак), осадки сточных вод (ОСВ) муниципальных биологических очистных сооружений г. Перми.

Обезвоживание

Для установления возможности управления опасными свойствами, обуславливающими токсическое воздействие шлама содового производства на окружающую природную среду (ОПС), были выполнены исследования по изучению влияния метода обезвоживания на токсические свойства шлама текущего выхода. Обезвоживание дистиллерной жидкости проводили методами отстаивания, фильтрования и центрифугирования.

Обезвоживание *отстаиванием* выполняли в статическом режиме в течение 30 суток.

Фильтрование исходной дистиллерной жидкости выполняли на вакуум-фильтре.

Обезвоживание дистиллерной жидкости методом *центрифугирования* проводили с использованием лабораторной центрифуги UC-4000 E (скорость вращения 4 000 об/мин, время центрифугирования 15 мин).

Биотестирование

Класс опасности исследуемых образцов определили методом биотестирования водной вытяжки на двух тест-объектах из разных систематических групп: низшие ракообразные *Ceriodaphnia affinis*, *Daphnia magna Straus*, зеленые протококковые водоросли *Scenedesmus quadricauda* и инфузории *Paramecium caudatum*, по утвержденным методикам количественного токсикологического анализа: «Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости цериодафний ФР.1.39.2007.03221», «Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний ФР.1.39.2007.03222», «Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей ФР.1.39.2007.03223», «Методика определения токсичности почвы и донных осадков экспресс-методом с применением прибора «Биотестер» ФР.1.39.2005.01883». Отнесение к классу опасности отходов для ОПС выполняли по приказу Министерства природных ресурсов РФ № 511 от 15 июня 2001 г. «Об утверждении критериев отнесения опасных отходов к классу опасности для окружающей среды».

Токсическое воздействие образцов шламов содового производства на *Ceriodaphnia affinis* определяли в водной вытяжке из образцов без разбавления (100 % исходная водная вытяжка), при разбавлении в 1,25 раза (80 %), в 2 раза (50 %) и в 4 раза (25 %). Время воздействия 48 часов, исходное количество *Ceriodaphnia affinis* – 30 шт. в каждом опыте.

Токсическое воздействие образцов шламов содового производства на *Daphnia magna Straus* в серии опытов определяли в водной суспензии (1:10), приготовленной из сухого отхода и дистиллиро-

ванной воды при перемешивании мешалкой в течение 8 часов, отстаиванием пробы в течение 12 часов с последующим фильтрованием. Время экспозиции водной суспензии 96 часов.

Токсическое воздействие образцов шламов содового производства на *Scenedesmus quadricauda* установили по изменению количества водорослей после воздействия на них водной вытяжки из отходов и сравнили с результатами холостого опыта (дистиллированной водой). Исходное количество зеленых протококковых водорослей в каждом опыте – 420 тыс. кл/см³. Период экспозиции 96 часов.

Токсическое воздействие образцов шламов содового производства на *Paramecium caudatum* определяли на приборе «Биотестер-2» по реакции биологических объектов, стремящихся переместиться в верхнюю часть кюветы, в раствор без токсических компонентов.

Материал для технической рекультивации

Информация о мелиоративных свойствах шламов содового производства стала основой для выдвижения гипотезы о возможности использования ШСП в составе материала для биологической рекультивации совместно с осадками сточных вод муниципальных биологических очистных сооружений. ОСВ относятся к четвертому классу опасности для ОПС, в их составе в большом количестве содержатся биогенные вещества (азот, фосфор, калий) и питательные для растений органические вещества [16, 17]. Однако использование ОСВ в качестве органических удобрений в сельском хозяйстве, лесоразведении, придорожном озеленении, при благоустройстве территорий, для биологической рекультивации нарушенных земель, рекультивации полигонов захоронения твердых коммунальных отходов и полигонов промышленных отходов, а также для производства почвогрунтов ограничено из-за высокого содержания тяжелых металлов и высоких показателей химического потребления кислорода в водной вытяжке отхода [18–21].

Изменение значений показателей, ограничивающих возможность использования материального потенциала ОСВ, возможно при компостировании, обработке реагентами или биопрепаратами, введении в их состав компонентов-структураторов. В качестве структуратора ОСВ было предложено использование мелкодисперсной фракции шлама содового производства, выделенной в результате центрифугирования.

Возможность совместного использования шламов содового производства и осадков сточных вод в качестве материала для биологической рекультивации определяли по классу опасности при воздействии на ОПС, соответствию установленным требованиям показателей реакции среды (рН) и химического потребления кислорода (ХПК) в водной вытяжке из образцов. В эксперименте были использованы составы материала в соотношениях шлам содового производства: осадки сточных вод 3:1; 2:1; 1:1; 1:2; 1:3. Исследование фитотоксичности

материала для биологической рекультивации выполняли методом проростков [22] для образцов состава ШСП: ОСВ: плодородный почвогрунт – 2:1:0, 1:1:0, 1:1:1. Методом проростков определяется угнетающее или стимулирующее влияние образцов. Эксперимент проводили с использованием быстро прорастающих семян овса и гороха. В ходе опыта были определены: всхожесть, энергия прорастания семян, длина растений и их корней, масса сухих растений и корней. В качестве контрольного образца применяли плодородный почвогрунт. На основании литературных данных известно о высокой степени корреляции индексов фитотоксичности и физико-химических параметров биоразлагаемых отходов [23].

Противогололедный материал

Дистиллерную жидкость, образовавшуюся после обезживания, было предложено использовать в качестве жидкого противогололедного материала. Для обоснования этой возможности выполнили экспериментальные исследования по определению соответствия ее качества требованиям ОДМ «Методика испытания потивогололедных материалов». В экспериментах определяли свойства: органолептические (внешний вид, цвет, запах); физико-химические (общая минерализация, рН, температура кристаллизации); технологические (плавающая способность); экологические (коррозионная активность на металл). Для эксперимента использовали три образца дистиллерной жидкости с разным содержанием исходной осветленной дистиллерной жидкости (86 г/дм³) и образцов, полученных при ее концентрировании (219 и 274 г/дм³). На основании требований «Методики...» вначале были определены физико-химические свойства образцов, после – плавающая способность – путем полива и распределения равномерным слоем на предварительно подготовленную (намороженную и выровненную) поверхность льда толщиной 1 см (рис. 3) с дальнейшим удалением образовавшегося рассола (рис. 4).



Рис. 3. Подготовленный лед

Fig. 3. Prepared ice

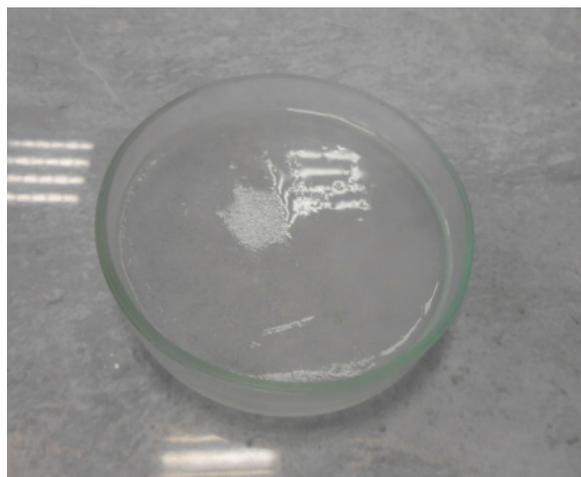


Рис. 4. Лёд с образцом дистиллерной жидкости

Fig. 4. Ice with a sample of distillery liquid

Исследование коррозионной активности выполнили с использованием плоских металлических пластин прямоугольной формы из стали (марки ст. 3), которые помещали в образцы дистиллерной жидкости с последующим определением потери массы пластины на единицу площади за промежутки времени.

Асфальтобетон

Для шлама содового производства, обезвоженного методом отстаивания, были определены физико-механические свойства (зерновой состав, пористость, набухание образцов из смеси порошка с битумом, средняя и истинная плотность) и установлено, что они соответствуют требованиям ГОСТ Р 52129–2003 «Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей». Шлам содового производства ввели в состав горячей асфальтобетонной смеси для замены минерального неактивированного порошка в количестве от 3 до 5 % (табл. 1) и исследовали на соответствие требованиям, определенным ГОСТ 9128–84* к асфальтобетонным смесям по показателям: средняя плотность, водонасыщение, предел прочности при сжатии при 20 °С, предел прочности при сжатии при 50 °С, предел прочности при сжатии при 0 °С, водостойкость.

Таблица 1. Компонентный состав асфальтобетонных смесей, %

Table 1. Component composition of asphalt mixtures, %

Компонент смеси Component of a mixture	Состав/Composition			
	1	2	3	4
Щебень (5–20 мм) Crushed stone (5–20 mm)	40			
Песок из отсева дробления (0–5 мм) Sand from screening crushing (0–5 mm)	55			
Минеральный порошок (МП-1) Mineral powder (MP-1)	5	2	1	–
Шлам содового производства Soda production sludge	–	3	4	5
Битум БНД 60/90 (сверх 100 %) Bitumen BND 60/90 (in addition to 100 %)	5,3			

Результаты исследования и обсуждение

Обезвоживание

Основным компонентом исходной дистиллерной жидкости, в пересчете на 1 т 100 % кальцинированной соды, является хлорид кальция (табл. 2).

Анализ водной фазы дистиллерной жидкости до и после отстаивания показывает, что с ней удаляется значительная часть растворимых форм хлоридов кальция, натрия и калия, а также дополнительно в водную фазу переходят растворимые сульфаты (рис. 5). Эффективность удаления твердой фазы методом отстаивания достигает 99,9 %.

Таблица 2. Состав дистиллерной жидкости в пересчете на 1 т 100 % кальцинированной соды

Table 2. Composition of distilled liquid in terms of 1 ton of 100 % soda ash

Компонент Component	Количество, кг Quantity, kg	Массовая доля, % Weight fraction, %
NaCl	476,9	3,63
NH ₄ OH	1,3	0,01
CaCO ₃	43,4	0,41
CaO	51,8	0,50
CaSO ₄	20,2	0,19
CaCl ₂	1045	10,08
Ca(OH) ₂	17,6	0,17
Прочие примеси Other impurities	60,3	0,58
Вода/Water	8651,7	83,45
Всего/Total	10368,4	100

Применение различных методов обезвоживания дистиллерной жидкости позволяет достигнуть следующих значений влажности обработанных шламов: отстаивание – 75 %, фильтрование – 65 % и центрифугирование – 60,2 %.

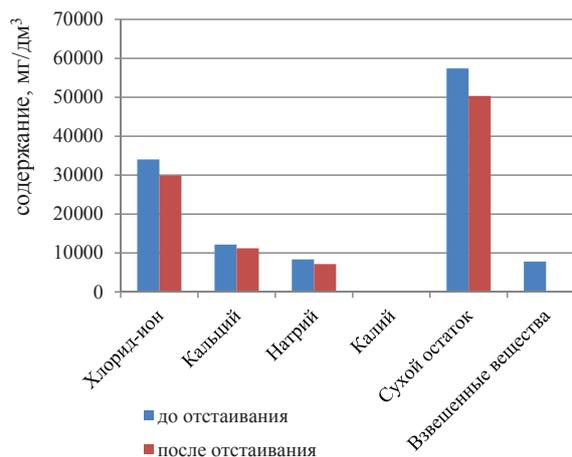


Рис. 5. Снижение содержания водорастворимых компонентов в процессе отстаивания дистиллерной жидкости

Fig. 5. Decreasing the amount of soluble components in settling distilled liquid

Основным компонентом твердой фазы шлама содового производства (обезвоженного методом центрифугирования) является карбонат кальция

(табл. 3). Это определяет его высокий материальный потенциал, но ограничивающими широкое использование являются высокие значения pH водной вытяжки и общего солевого содержания. Эти же факторы обуславливают токсикологическую опасность отхода.

Таблица 3. Компонентный состав твердой фазы шлама содового производства, (% мас.)

Table 3. Component composition of solid phase of soda production sludge, (wt. %)

pH водной вытяжки pH of aqueous extract (1:10)	10,5–12,3 ед. pH (unit pH)	K ⁺	0,1
Влажность/Humidity	60,2	CO ₃ ²⁻	20,5
Ca ²⁺	13,7	SO ₄ ²⁻	0,7
Mg ²⁺	0,2	CL ⁻	0,3
Na ⁺	0,1	Si ⁴⁺	3,8

Биотестирование

Степень воздействия на окружающую среду шламов содового производства, обезвоженных методом отстаивания (применяется в шламонакопителях «Белое море»), устанавливали по результатам биотестирования водной вытяжки на двух тест-объектах из различных систематических групп. Установлено, что индекс токсичности исходной дистиллированной жидкости без разбавления составил 0,65, что превышает уровень нетоксичности (0–0,4) и данный образец токсичен для *Ceriodaphnia affinis* и *Paramecium caudatum*. Шлам содового производства, обезвоженный отстаиванием, на основании биотестирования относится к 4 классу опасности для ОПС. Токсичные свойства образцов обусловлены высоким значением реакции среды (pH 8,5–12,6) и содержанием в исходной дистиллированной жидкости хлорид- и сульфат-ионов, которые при отстаивании задерживаются в поровом пространстве шламов и при испарении влаги концентрируются.

Биотестирование водной вытяжки шламов содового производства, обезвоженных методом фильтрования, позволило установить, что шлам оказывает токсическое воздействие на *Ceriodaphnia affinis*, *Paramecium caudatum* и относится к 4 классу опасности для окружающей природной среды [24].

На основании результатов биотестирования водной вытяжки шлама содового производства, обезвоженного методом центрифугирования, установлено, что шлам относится к 4 классу опасности отхода по воздействию на *Daphnia magna Straus* и к 5 классу опасности по воздействию на *Scenedesmus quadricauda*.

В процессе обработки образцов методом центрифугирования было установлено, что исходная дистиллированная жидкость разделяется на 3 фракции: жидкая (pH=10,5), твердый образец мелкодисперсного состава (<0,5 мм) (pH=8,3) и твердый образец крупнодисперсного состава (>0,5 мм) (pH=12,1).

Исследование токсических свойств образца, представленного твердой мелкодисперсной фракцией, выделенной в результате центрифугирования, позволило установить, что по результатам воздействия на *Daphnia magna Straus* и *Scenedesmus quadricauda* образец относится к 5 классу опасности отходов по воздействию на ОПС и не обладает токсичными свойствами.

Таким образом, в результате исследований установлено, что обезвоживание дистиллированной жидкости методом центрифугирования позволяет исключить опасные свойства шламов содового производства и обеспечивает возможность извлечения материального потенциала отходов содового производства.

Материал для технической рекультивации

Опасные для ОПС свойства шламов содового производства и осадков сточных вод, ограничивающие возможность использования материального потенциала каждого из исследуемых отходов, обусловлены различными факторами, в то же время при совместном использовании отходов возможно получение материала для биологической рекультивации, физико-химические и токсикологические свойства которого соответствуют установленным требованиям. Для обоснования возможности извлечения материального потенциала шлама содового производства и осадков сточных вод были подобраны компонентные составы материала для биологической рекультивации в соотношениях шлам содового производства: осадки сточных вод – 3:1; 2:1; 1:1; 1:2; 1:3. Для предложенных составов были исследованы значения показателей, лимитирующие извлечение материального ресурса отходов. Полученные результаты (табл. 4) свидетельствуют о возможности изменения физико-химических свойств отходов и позволяют рекомендовать материал на основе осадков сточных вод и шлама содового производства в соотношениях ОСВ: ПСП 2:1 и 1:1 для дальнейшего исследования по определению фитотоксичности образцов.

Таблица 4. Свойства материала для биологической рекультивации

Table 4. Material properties for biological reclamation

Показатель Parameter	Допустимые значения Acceptable value	Шлам содового производства Soda production sludge	ОСВ Sewage sludge	Компонентный состав смеси: осадки сточных вод: шлам содового производства Component composition of a mixture: sewage sludge: soda production sludge				
				3:1	2:1	1:1	1:2	1:3
pH	5,5–8,5	12,4	7,2	7,4	7,5	8,4	8,7	10,8
ХПК, мгО/дм ³ Chemical oxygen demand, mgO/dm ³	Не более 5000	859	9568	5912	4875	3680	3005	2425

Результаты исследований фитотоксичности материалов для биологической рекультивации на основе ШСП, ОСВ и плодородного почвогрунта (ПП) (табл. 5) позволили установить нецелесообразность использования исходных шламов содового производства (рис. 6). Это может быть обусловлено высоким содержанием водорастворимых солей и значением pH исходных шламов. По расчетам был установлен фитотоксичный эффект для разных компонентных составов материала.

Таблица 5. Результаты исследования фитотоксичности материалов для биологической рекультивации

Table 5. Results of the study of phytotoxicity of materials for biological reclamation

Компоненты ОСВ:ШСП:ПП Components of sewage sludge: soda production sludge: fertile soil	Проростки семян овса, шт. Oat seedlings, pieces	Проростки семян гороха, шт. Pea seedlings, pieces	Общая всхожесть, шт. Total germination, pieces	Фитотоксичный эффект, % Phytotoxic effect, %
Контроль Control	4	3	7	Не определяется Not defined
исходные шламы содового производства (4 класс опасности, pH 12,8) original soda production sludge (4 class of hazard, pH of 12,8)				
1:1:0	0	0	0	100
1:1:1	0	0	0	100
2:1:0	2	5	7	37
мелкодисперсная фракция шламов содового производства (5 класс опасности, pH 7,8) fine fraction of soda production sludge (5 class of hazard, pH 7,8)				
1:1:0	2	4	6	13,1
2:1:0	3	6	9	7,2

Самый высокий фитотоксичный эффект – 100 % – у пробы с компонентным соотношением ОСВ: ШСП: ПП (исходные шламы содового производства 4 класс опасности, pH=12,8) 1:1:0. Самый

низкий фитотоксичный эффект – 7,2 % – у пробы с компонентным соотношением ОСВ:ШСП:ПП (мелкодисперсная фракция 5 класс опасности, pH=7,8) 2:1:0. Проращение семян в данном опыте сопоставимо с контрольным опытом, что свидетельствует о целесообразности использования предложенного материала для биологической рекультивации нарушенных земель [25].

Общая всхожесть семян в образцах с мелкодисперсной фракцией шламов содового производства выше при увеличении содержания осадков сточных вод. В эксперименте с образцами состава ОСВ: ШСП: П 2:1:0 получена наилучшая общая всхожесть и проращение семян гороха. В контрольном образце определено наилучшее проращение семян овса.

Полученный в результате исследований материал обладает новыми свойствами, отсутствующими у исходных отходов производства, удовлетворяющими требованиям к материалам для биологической рекультивации. Предлагаемый техногенный материал для биологической рекультивации может быть использован взамен природных. Использование разработанного материала позволит снизить: объемы размещения в окружающей среде отходов, затраты на покупку материалов для рекультивации и объемы потребления природных ресурсов для биологической рекультивации – плодородных почвогрунтов, торфяных смесей и т. д. Ввиду содержания в составе предложенного материала для биологической рекультивации соединенной азота и фосфора, находящихся в легкодоступной для растений форме, возможно снижение нормы внесения минеральных удобрений при последующем выполнении фитомелиоративных мероприятий. Присутствие в материале для биологической рекультивации карбоната кальция позволит исключить применение дополнительных приемов известкования и стимулирования естественного зарастания нарушенных земель [26].



Рис. 6. Результаты эксперимента на фитотоксичность состава ОСВ: ШСП: почва

Fig. 6. Results of the experiment on phytotoxicity of the composition sewage sludge: soda ash: soil

Противогололедный материал

Все исследуемые образцы по органолептическим свойствам соответствуют требованиям, предъявляемым к противогололедным материалам (табл. 6). На основании полученных результатов установили, что образец № 1 не отвечает требованиям, предъявляемым к жидким противогололедным материалам, по показателю «плавающая способность». В дальнейших экспериментах данный образец не использовался. Противогололедные свойства образцов № 2 и 3 и их коррозионная активность (рис. 7, а, б) соответствуют нормативным требованиям, предъявляемым к жидким противогололедным материалам, и могут быть рекомендованы к применению.

Таблица 6. Противогололедные свойства осветленной дистиллированной жидкости

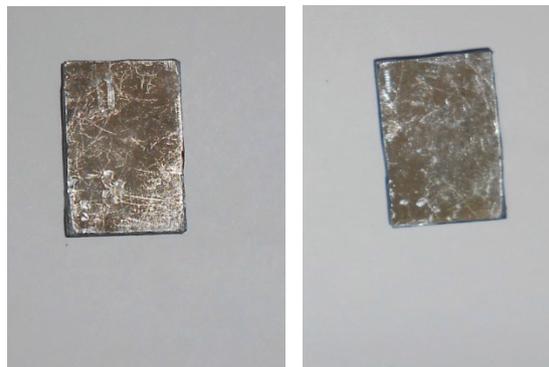
Table 6. Deicing properties of the clarified distilled liquid

Показатель Parameter	Допустимые значения Acceptable value	Результат/Test result		
		Образец/Sample		
		1	2	3
Внешний вид Appearance	Водный раствор без механических включений, осадка и взвеси Water solution without mechanical inclusions, sediment and			
Цвет/Color	Светлый, прозрачный/Light, transparent			
Запах/Smell	Отсутствует/Missing			
Водородный показатель, ед. рН Hydrogen index, units pH	5–9	8,72	8,75	8,74
Массовая доля растворимых солей, % Mass fraction of soluble salts, %	Не менее 20 Not less than 20	8,6	21,9	27,4
Температура кристаллизации, °С Crystallization temperature, °С	Не выше –10 Not higher than –10	–15	–17	–18
Плавающая способность, г/г Melting ability, g/g	Не менее 2,5 Not less than 2,5	0,6	2,5	3,2
Т (°С)=0...–4			2,8	3,5
Т (°С)=–6...–10			3,1	3,8
Коррозионная активность на металл, мг/см ² *сут Metal corrosion activity, mg/cm ² *day	Не более 0,8 Not more than 0,8	Не определяли Not determined	0,06–0,11	0,11–0,16

Асфальтобетон

Результаты определения физико-механических свойств шлама содового производства и сравнение их с требованиями, предъявляемым к минеральным порошкам для асфальтобетонных и органоминеральных смесей, показали, что физико-механические свойства соответствуют требованиям для активированного порошка марки МП-1 и шлам содового производства может быть включен в составы

горячих асфальтобетонных смесей в качестве заменителя минерального порошка (табл. 7).



а/а образец/sample № 2 б/б образец/sample № 3

Рис. 7. Металлические пластины после испытаний на коррозионную активность

Fig. 7. Metal plates after testing for corrosiveness

Таблица 7. Физико-механические свойства шлама содового производства

Table 7. Physico-mechanical properties of the soda production sludge

Показатель Parameter	Ед. изм. Units	Допустимые значения Acceptable value	Результаты Test results
Зерновой состав Grain structure			100
мельче 1,25 мм smaller than 1,25 mm	% по массе wt. %	Не менее 100 Not less than 100	96,7
мельче 0,31 мм smaller than 0,31 mm			80,2
мельче 0,071 мм smaller than 0,071 mm			
Пористость Porosity		35	33,8
Набухание образцов из смеси порошка с битумом Swelling of samples from powder mixture with bitumen	% по объему, не более % in % volume, not more	2,5	1,05
Средняя плотность Average density	г/см ³ g/cm ³	–	1,8
Истинная плотность Real density		–	2,72

По результатам исследования физико-механических свойств асфальтобетонных смесей различного состава с включением шлама содового производства установлено, что образцы состава № 1 (без шлама содового производства) и состава № 3 (с содержанием шлама содового производства 4 %) соответствуют предъявляемым нормативным требованиям (табл. 8). Возможно повышение содержания шлама содового производства в составе асфальтобетонной смеси при увеличении содержания битума более 5,3 % (свыше 100 %).

Таблица 8. Физико-механические свойства асфальтобетонных смесей

Table 8. Physico-mechanical properties of asphalt mixtures

Показатель Parameter	Допустимые значения Acceptable value	Результаты Test results			
		Состав/Composition			
		1	2	3	4
Средняя плотность, г/см ³ Average density, g/cm ³	–	2,4	2,6	2,6	2,6
Водонасыщение, % Water saturation, %	1,5–4	3,6	3,98	4	4,3
Предел прочности при сжатии при 20 °С, МПа Compression strength at 20°, МПа	Не менее 2,2 Not less than 2,2	3,9	4,7	4,1	4
Предел прочности при сжатии при 50 °С, МПа Compression strength at 50°, МПа	Не менее 1,0 Not less than 1,0	1,8	1,35	1,4	1,45
Предел прочности при сжатии при 0 °С, МПа Compression strength at 0°, МПа	Не более 12 Not more than 12	9	10	8,4	7,7
Водостойкость Water resistance	Не менее 0,85 Not less than 0,85	0,85	0,76	0,85	0,9

Заключение

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить, что токсичные для окружающей среды свойства шламов содового производства обусловлены наличием в их составе водорастворимых солей (хлориды кальция и натрия). Удаление из шламов водорастворимых солей различными методами обезвреживания позволяет управлять опасными свойствами и снижать класс опасности.

Обезвреживание шламов содового производства методом центрифугирования позволяет выделить

мелкодисперсную фракцию (<0,5 мм; рН=8,3), которая обладает материальным потенциалом. В результате совместного использования шламов содового производства и осадков сточных вод в соотношениях осадки сточных вод: шлам содового производства 2:1 и 1:1 получен материал, пригодный для биологической рекультивации и характеризующийся новыми физико-химическими свойствами.

По результатам исследования физико-химических и технологических показателей жидкой фракции дистиллерной жидкости установлено, что при содержании растворимых солей 22–27 % она может быть использована в качестве жидкого противогололедного материала.

По результатам испытаний физико-механических свойств определена возможность использования шламов содового производства в составе горячих асфальтобетонных смесей в качестве заменителя минерального порошка в количестве до 3 %.

Проведенные исследования позволили установить принципиальную возможность снижения токсичных свойств шламов содового производства путем изменения способа обезвреживания. Разделение шламов содового производства в результате обезвреживания на различные фракционные группы позволяет выделить подходящую для последующей переработки и утилизации. Утилизация шламов содового производства с изготовлением новых продуктов, обладающих товарными свойствами, позволяет снизить техногенную нагрузку содового производства на объекты окружающей среды и снизить объемы потребления георесурсов для их производства.

В настоящее время авторами продолжаются работы по поиску дальнейших направлений утилизации шламов содового производства, в том числе фракций, неиспользованных в данной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шатов А.А., Кутырев А.С., Бадертдинов Р.Н. Некоторые пути утилизации отходов производства соды // Башкирский экологический вестник. – 2013. – № 3–4. – С. 8–16.
- Крепышева И.В., Рудакова Л.В., Колзлов С.Г. Физико-химические и токсикологические свойства шлама содового производства // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 1. – С. 335–342.
- Использование отходов содового производства в дорожном строительстве / С.Г. Козлов, И.В. Вязовикова, С.А. Черный, И.В. Крепышева // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10. – С. 10–12.
- Электронные карты. URL: <https://www.google.ru/maps/@53.6695015,56.0027204,13z/data=!3m1!1e3> (дата обращения 24.04.2017).
- Электронные карты. URL: <https://www.google.ru/maps/@59.413638,56.7227189,12z/data=!3m1!1e3> (дата обращения 24.04.2017).
- Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals – Solids and Others industry. URL: <http://www.gccpcenvi.nic.in/BATDoc/Large%20volume%20inorganic%20chemical-solid%20and%20others.pdf> (дата обращения: 14.11.2016).
- Пугин К.Г., Пугина В.К. Особенности использования ресурсного потенциала отходов производства для получения строительных конструкций и материалов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 9. – С. 289–293.
- Калинина Е.В. Наилучшие доступные технологии утилизации шламов содового производства // Экология и промышленность России. – 2013. – № 11. – С. 43–47.
- Санитарно-гигиеническая оценка отходов содового производства / Н.М. Самутин, Я.И. Вайсман, Л.В. Рудакова, Е.В. Калинина, И.С. Глушанкова, Г.М. Батракова // Гигиена и санитария. – 2013. – № 2. – С. 30–33.
- Использование отходов производства кальцинированной соды для получения известьесодержащих вяжущих и строительных материалов на их основе / А.А. Оратовская, Д.А. Синицин, Л.Ш. Галеева, В.В. Бабков, А.А. Шатов // Строительные материалы. – 2012. – № 2. – С. 52–53.
- Сырьевая смесь для изготовления легкого ячеистого бетона: пат. 2114088 Рос. Федерации № 95121564/03; заявл. 19.12.1995; опубл. 27.06.1998. – 3 с.
- Тампонажный раствор: пат. 2136845 Рос. Федерации № 97122217/03; заявл. 23.12.1997; опубл. 10.09.1999. – 6 с.
- Максимович Н.Г., Крюкова О.С. Разработка процессов взаимной нейтрализации производственных отходов содового произ-

- водства, кислых шахтных вод и шахтных отвалов для защиты окружающей среды // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 1. – С. 271–272.
14. Jinhui Li. Wastes could be resources and cities could be mines // Waste Management and Research. – 2015. – V. 33 (4). – P. 301–302.
 15. Mukharjee B.B., Barai S.V. Development of construction materials using nano-silica and aggregates recycled from construction and demolition waste // Waste Management and Research. – 2015. – V. 33 (6). – P. 515–523.
 16. Гуляева И.С. Обработка и детоксикация осадков городских сточных вод, содержащих тяжелые металлы: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2015. – 195 с.
 17. Utilization of sewage sludge with the receipt of commercial products / Y. Vaisman, I. Glushankova, M. Dyakov, I. Gulyaeva // Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection: 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference and EXPO, SGEM 2012. – Albena, 2012. – P. 1037–1046.
 18. Kuryntseva P., Galitskaya P., Selivanovskaya S. Changes in the ecological properties of organic wastes during their biological treatment // Waste Management. – 2016. – V. 58. – P. 90–97.
 19. Effect of energy Grass on methane production and heavy metal fractionation during anaerobic digestion of sewage sludge / Min Zhang, Changming Yang, Yachao Jing, Jianhua Li // Waste Management. – 2016. – V. 58. – P. 316–323.
 20. Effects of aerobic and anaerobic biological processes on leaching of heavy metals from soil amended with sewage sludge compost / Wen Fang, Yonghong Wei, Jianguo Liu, D.S. Kosson, H.A. van der Sloot, Peng Zhang // Waste Management. – 2016. – V. 58. – P. 324–334.
 21. Chan W.P., Wang J.-Y. Comprehensive characterisation of sewage sludge for thermochemical conversion processes – Based on Singapore survey // Waste Management. – 2016. – V. 54. – P. 131–142.
 22. Бурыкина А.М. Рекультивация почв, нарушенных промышленностью. – Воронеж: Центр. Черноземное кн. Издание, 1980. – 55 с.
 23. Development of phytotoxicity indexes and their correlation with ecotoxicological, stability and physicochemical parameters during passive composting of poultry manure / B.J. Young, P.F. Rizzo, N.I. Riera, V.D. Torre, V.A. Lopez, C.D. Molina, F.E. Fernandes, D.C. Crespo, R. Barrena, D. Komilis, A. Sanches // Waste Management. – 2016. – V. 54. – P. 101–109.
 24. Substantiation of the use of sludge calcium carbonate for insulation of solid waste at landfill / E. Kalinina, I. Glushankova, L. Rudakova, Ya. Vaisman // ISWA Beacon Conference. The 2nd International Conference on Final Sinks – Sinks a Vital Element of Modern Waste Management. – Espoo, Finland, 16–18 May 2013. – P. 191–195.
 25. Половников А.В. Рекультивация и мелиорация нарушенных земель. – Пермь: Изд-во Пермской ГСХА, 2016. – 51 с.
 26. Vik E.A., Bardos P. Remediation of Contaminated Land Technology Implementation in Europe: a report from the Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies. CLAINET, 2002. 188 p. URL: http://www.commonforum.eu/Documents/DOC/Clarinet/WG7_Final_Report.pdf (дата обращения 19.06.2014).

Поступила 21.02.2018 г.

Информация об авторах

Калинина Е.В., кандидат технических наук, доцент кафедры охраны окружающей среды Автодорожного факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Рудакова Л.В., доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой охраны окружающей среды Автодорожного факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 661.333.013:628.54+658.567.5

DECREASE OF TOXIC PROPERTIES OF SODA PRODUCTION SLUDGE AND ITS UTILIZATION

Elena V. Kalinina¹,
Kalininaelena1@rambler.ru

Larisa V. Rudakova¹,
larisa@eco.pstu.ac.ru

¹ Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolsky Avenue, Perm, 614990, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to develop the ways of decreasing toxic properties of soda production sludge and its utilization.

The main aim is to study the possibility of reducing the environmentally hazardous properties of soda production sludge and subsequent disposal.

The methods. To reduce the environmentally hazardous properties of soda production sludge the authors have proposed dewatering the source distilled liquid by sedimentation, filtration and centrifugation. Biotesting of water extracts was carried out on test objects of different systematic groups (*Ceriodaphnia affinis*, *Daphnia magna* Straus, *Scenedesmus quadricauda* and *Paramecium caudatum*). Physico-chemical properties of soda production sludge and distilled liquid were determined according to the established procedures. Phytotoxicity of the material for biological reclamation was studied by the seedlings method using oat and pea seeds. Physico-chemical properties, melting capacity and corrosion activity of the samples of liquid deicing materials was determined by «Method of testing anti-icing materials». Physical and mechanical properties of soda production sludge were determined by the requirements of the State Standard R 52129–2003 «Mineral powder for asphalt and organomineral mixtures». For hot asphalt mix with soda production sludge the performance was determined in accordance with the requirements of the State Standard 9128–84 «A mixture of asphalt road, airfield and asphalt concrete. Technical conditions».

The results of the research allowed the authors to determine that the soda production sludge has properties hazardous to the environment that can be removed by changing the way of dehydration. The fine fraction of sludge (<0,5 mm; pH=8,3) is the least hazardous for the environment. This fraction is isolated by centrifugation and it can be used with excess activated sludge of biological treatment facilities in the material for biological reclamation. Concentrated distilled liquid can be used as a deicing material. The soda production sludge dehydrated by settling, is similar to mineral powder brand MP-1 on physical and mechanical properties and it can be used to replace it in production of hot asphalt mixtures.

Key words:

Soda production sludge, distilled liquid, «The White sea», liquid anti-icing material, material for biological reclamation, mineral powder, asphalt concrete mix.

REFERENCES

1. Shatov A.A., Kutuyev A.S., Badertdinov R.N. Some ways of waste production of soda. *Bashkirskii ekologicheskiy vestnik*, 2013, no. 3–4, pp. 8–16. In Rus.
2. Krepyshcheva I.V., Rudakova L.V., Kozlov S.G. Physico-chemical and toxicological properties of the soda production sludge. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy biulleten*, 2015, no. 1, pp. 335–342. In Rus.
3. Kozlov S.G., Vyazovikova I.V., Cherny S.A., Krepyshcheva I.V. Use of soda production waste in road construction. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2013, no. 10, pp. 10–12. In Rus.
4. *Elektronnye karty* [Electronic maps]. Available at: <https://www.google.ru/maps/@53.6695015,56.0027204,13z/data=!3m1!1e3> (accessed 24 April 2017).
5. *Elektronnye karty* [Electronic maps]. Available at: <https://www.google.ru/maps/@59.413638,56.7227189,12z/data=!3m1!1e3>. (accessed 24 April 2017).
6. *Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals – Solids and Others industry*. Available at: <http://www.gpcpcenvs.nic.in/BATDoc/Large%20volume%20inorganic%20chemical-solid%20and%20others.pdf> (accessed 14 November 2016).
7. Pugin K.G., Pugin V.K. Features of using resource potential of waste for production of building structures and materials. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2016, no. 9, pp. 289–293. In Rus.
8. Kalinina E.V. Best available technologies for disposal of soda production sludge. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*, 2013, no. 11, pp. 43–47. In Rus.
9. Samutin N.M., Vaisman Ya.I., Rudakova L.V., Kalinina E.V., Glushankova I.S., Batrakova G.M. Sanitary and hygienic assessment of waste of soda production. *Gigiena i sanitariya*, 2013, no. 2, pp. 30–33. In Rus.
10. Oratovskaya A.A., Sinityn D.A., Galeeva L.Sh., Babkov V.V., Shatov A.A. The use waste of soda ash production to obtain lime-containing binders and building materials based on them. *Stroitelnye materialy*, 2012, no. 2, pp. 52–53. In Rus.
11. Shatov A.A., Titov V.M., Voronin A.V., Sergeev V.N., Fisenko L.K., Gareev A.T., Badertdinov R.N. *Syrevaya smes dlya izgotovleniya leghogo yacheistogo betona* [Raw material mixture for manufacturing lightweight cellular concrete]. Patent RF, no. 2114088, 1998.
12. Karimov N.Kh., Agzamov F.A., Akchurin Kh.I., Dolgikh F.A., Shkaretny V.I., Gazizov Kh.V., Karimov I.N. *Tamponazhnyy rastvor* [Cement slurry]. Patent RF, no. 2136845, 1999.
13. Maksimovich N.G., Kriukova O.S. Development of the processes of mutual neutralization of industrial waste of soda production, acid mine drainage and mine waste dumps for environmental protection. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2012, no. 1, pp. 271–272. In Rus.
14. Jinhui Li. Wastes could be resources and cities could be mines. *Waste Management and Research*, 2015, vol. 33 (4), pp. 301–302.
15. Mukharjee B.B., Barai S.V. Development of construction materials using nano-silica and aggregates recycled from construction and demolition waste. *Waste Management and Research*, 2015, vol. 33 (6), pp. 515–523.
16. Guliaeva I.S. *Obrabotka i detoksikatsiya osadkov gorodskikh stochnykh vod, soderzhashchikh tiashchelye metally*. Dis. Kand.

- nauk [Treatment and detoxification of sediments of urban wastewater containing heavy metals Cand. Diss.]. Perm, 2015. 195 p.
17. Vaisman Y., Glushankova I., Dyakov M., Gulyaeva I. Utilization of sewage sludge with the receipt of commercial products. *Modern Management of Mine Producing Geology and Environmental Protection. 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference and EXPO*. Alena, 2012. pp. 1037–1046.
 18. Kuryntseva P., Galitskaya P., Selivanovskaya S. Changes in the ecological properties of organic wastes during their biological treatment. *Waste Management*, 2016, vol. 58, pp. 90–97.
 19. Min Zhang, Changming Yang, Yachao Jing, Jianhua Li. Effect of energy Grass on methane production and heavy metal fractionation during anaerobic digestion of sewage sludge. *Waste Management*, 2016, vol. 58, pp. 316–323.
 20. Wen Fang, Yonghong Wei, Jianguo Liu, Kosson D.S., van der Sloot H.A., Peng Zhang. Effects of aerobic and anaerobic biological processes on leaching of heavy metals from soil amended with sewage sludge compost. *Waste Management*, 2016, vol. 58, pp. 324–334.
 21. Chan W.P., Wang J.-Y. Comprehensive characterisation of sewage sludge for thermochemical conversion processes – Based on Singapore survey. *Waste Management*, 2016, vol. 54, pp. 131–142.
 22. Burykina A.M. *Rekultivatsiy pochv, narushennykh promyshlennosti* [Soil reclamation of disturbed industry]. Voronezh, Tsentralnoe Chernozemnoe knizhnoe izdanie, 1980. 55 p.
 23. Young B.J., Rizzo P.F., Riera N.I., Torre V.D., Lopez V.A., Molina C.D., Fernandes F.E., Crespo D.C., Barrena R., Komilis D., Sanches A. Development of phytotoxicity indexes and their correlation with ecotoxicological, stability and physicochemical parameters during passive composting of poultry manure. *Waste Management*, 2016, vol. 54, pp. 101–109.
 24. Kalinina E., Glushankova I., Rudakova L., Vaisman Ya. Substantiation the use of sludge calcium carbonate for insulation of solid waste at landfill. *ISWA Beacon Conference. The 2nd Int. Conf. on Final Sinks – Sinks a Vital Element of Modern Waste Management*. Espoo, 2013. pp. 191–195.
 25. Polovnikov A.V. *Rekultivatsiya i melioratsiya narushennykh zemel* [Remediation and reclamation of disturbed lands]. Perm, Perm GSKhA Press, 2016. 51 p.
 26. Vik E.A., Bardos P. Remediation of Contaminated Land Technology Implementation in Europe: a report from the Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies. *CLAINET*, 2002. 188 p. Available at: http://www.commonforum.eu/Documents/DOC/Clarinet/WG7_Final_Report.pdf (accessed 19 June 2014).

Received: 21 February 2018.

Information about the authors

Elena V. Kalinina, Cand. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

Larisa V. Rudakova, Dr. Sc., professor, head of the department, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 556.314.6:546.65:628.113(571.16)

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ТОМСКОГО ВОДОЗАБОРА

Попов Виктор Константинович¹,
pvk@tpu.ru

Пасечник Елена Юрьевна¹,
paseyu@yandex.ru

Проценко Полина Игоревна¹,
p.i.petrova@mail.ru

Гончаров Олег Юрьевич²,
goncharov@vodokanal.tomsk.ru

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

² ООО «Томскводоканал»,
Россия, 634021, г. Томск, ул. Водозаборная, 2.

Актуальность. Редкоземельные элементы являются индикаторами экологического состояния подземных вод и могут применяться в системе мониторинга водных объектов. Таким образом, актуальность проблемы определяется слабой изученностью механизма и характера поведения редкоземельных элементов в подземных водах. Для вод, эксплуатируемых скважинами Томского водозабора, подобные исследования проводятся впервые.

Цель: определение основных закономерностей изменения концентраций и распределения редкоземельных элементов в водах эксплуатационных скважин Томского подземного водозабора.

Объекты. В основу работы положены результаты гидрогеохимического опробования 18 скважин Томского водозабора I-ой и III-ей очередей, выполненного в 2016–2017 гг.

Методы. Концентрацию редкоземельных элементов определяли масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой.

Результаты. Проведено исследование распределения редкоземельных элементов в подземных водах Томского водозабора. Отдельно проанализированы группы тяжелых и легких редкоземельных элементов, а также по отдельности группы скважин. Уровни содержания редкоземельных элементов в изученных водах крайне низки (доли мкг/л). Выявлена тенденция к увеличению суммарной концентрации редкоземельных элементов с юга на север. Отличительной особенностью изученных вод является наличие положительной европиевой аномалии, что наблюдается в пробах, отобранных в зимние месяцы. Кроме этого, выявлены аномалии церия (Ce) и неодима (Nd) в скважине № 144 (за счет увеличения Σ ЛРЗЭ). Обсуждаются причины появления этих аномалий. Вероятнее всего, уровень концентраций растворенных редкоземельных элементов в подземных водах определяется концентрациями редкоземельных элементов в водовмещающих породах, а также особенностями техногенного загрязнения вод.

Ключевые слова:

Подземные воды, Томский подземный водозабор, редкоземельные элементы, геохимия вод, закономерности распределения.

Введение

К группе редкоземельных элементов (РЗЭ) или лантаноидов относятся элементы, входящие в 3-ю группу таблицы Менделеева от La до Lu (всего 14 элементов). Их делят на две группы: легкие РЗЭ (LREE) – La, Ce, Pr, Nd, Sm и тяжелые РЗЭ (HREE) – Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, иногда на три: легкие (La–Pr), средние (Nd–Gd), тяжелые (Tb–Lu) [1].

Определение РЗЭ стало возможным благодаря появлению новых методов масс-спектрометрического анализа (ICP-MS), а в последнее время приборов ICP-MS высокого разрешения (HR-ICP-MS) [2].

Интерес к исследованию РЗЭ в водах связан с тем фактом, что профиль их распределения в воде в целом повторяет профиль распределения этих элементов в водовмещающих породах [3], т. е. РЗЭ могут быть использованы для выяснения процессов происхождения и эволюции вод [4, 5]. Кроме того, в последние годы появились работы по изуче-

нию редкоземельных элементов как одного из новых и малоизученных химических загрязнителей окружающей среды [6–10]. Редкоземельные элементы обладают токсичными свойствами и отрицательно влияют на здоровье человека [11]. В отечественной практике установлены предельно допустимые концентрации (ПДК) для питьевой воды только для Eu (0,3 мг/л) и Sm (0,024 мг/л) [11]. Основными источниками антропогенного загрязнения поверхностных водотоков редкоземельными элементами являются фосфорные удобрения, золоотвалы крупных ТЭЦ, месторождения сульфидных руд, отходы горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятий, а также неочищенные хозяйственно-бытовые стоки урбанизированных территорий [12].

Сходство поведения РЗЭ в природных процессах предоставляет огромные возможности для исследования источников вещества и характера протекающих геохимических процессов, а окислительно-вос-

становительные свойства церия и европия делают группу РЗЭ чувствительной к окислительно-восстановительной среде в природных процессах. Изучение форм нахождения и распределения РЗЭ в водной среде позволяет получить объективную информацию об условиях формирования вод [13].

В этой связи особую актуальность приобретает комплексное изучение РЗЭ в подземных водах Томского водозабора, так как этот вопрос исследуется впервые.

Объекты и методы исследований

Исзуемая территория располагается в пределах Обь-Томского междуречья и в административном отношении входит в состав Томского, Шегарского и Кожевниковского районов Томской области (рис. 1). В границах района исследований расположены г. Томск, Северск и ряд малых населенных пунктов с общим количеством жителей более 650 тыс. человек. Сибирский химический комбинат (СХК), значительное число средних и больших нефтехимических, машиностроительных, электротехнических, приборостроительных, фармацевтических и сельскохозяйственных предприятий, полигоны токсичных промышленных и бытовых отходов создают достаточно высокую техногенную нагрузку на территорию.

На территории междуречья расположен один из крупнейших в России подземных водозаборов, снабжающий питьевой водой г. Томск. На правом берегу р. Томи находятся два крупных площадных водозабора подземных вод г. Северска. Кроме этого, в населенных пунктах междуречья имеется множество небольших водозаборов и одиночных эксплуатационных скважин.

С декабря 1973 г. по настоящее время Томское месторождение подземных вод эксплуатируется Томским водозабором, обеспечивающим хозяйственно-питьевое водоснабжение г. Томска.

Водозабор представляет собой сложное гидротехническое сооружение, содержащее около 200 эксплуатационных скважин, систему водоводов, станцию обезжелезивания, резервуары чистой воды, хлораторную, расходный склад хлора,

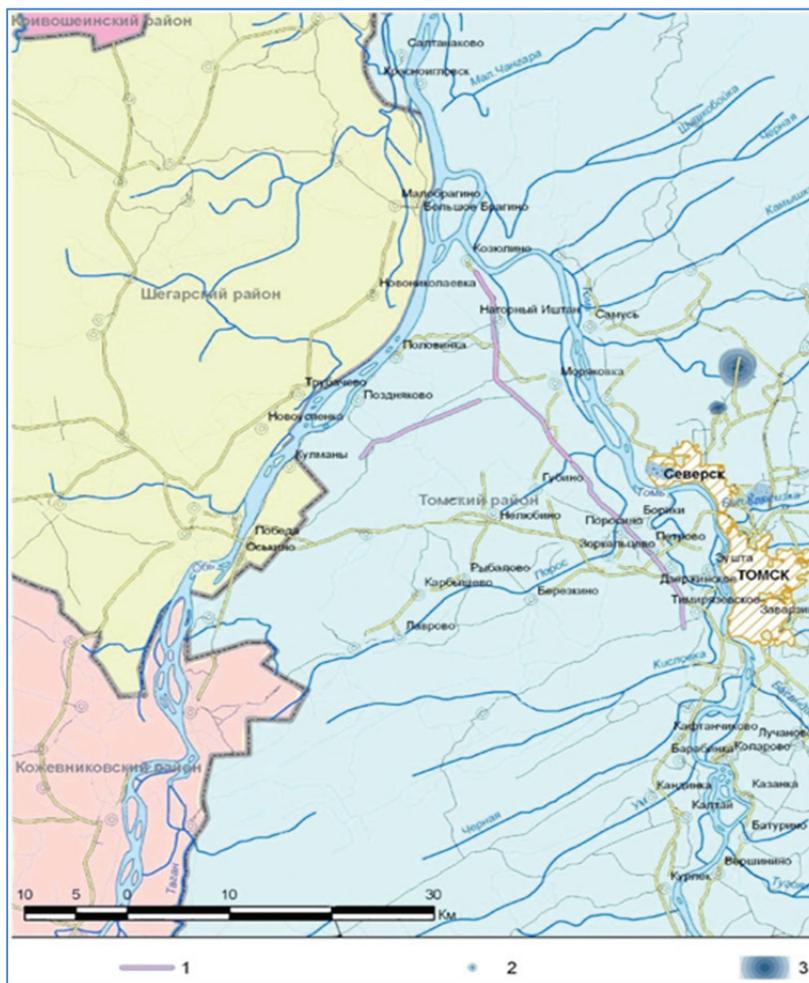


Рис. 1. Обзорная схема района работ: 1 – линии Томского водозабора; 2 – водозаборы г. Северска; 3 – полигоны глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов (ЖРО) СХК

Fig. 1. Scope of work: 1 is the Tomsk water intake line; 2 are the intakes of the city of Seversk; 3 are the polygons of deep burial of liquid radioactive waste (LRW) of the Siberian Chemical Combine

лочных и окислительно-восстановительных свойств, а также температуры и удельной электрической проводимости. Измерение указанных параметров выполнено посредством портативного мультипараметрового анализатора Water Test. Содержание редкоземельных элементов определялось с использованием масспектрального метода с индуктивно связанной плазмой в аккредитованной проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии НОЦ «Вода» ТПУ.

Результаты исследования и их обсуждение

Содержание РЗЭ в изученных водах представлены в таблице. По данным видно, что содержание РЗЭ крайне низкое – тысячные доли мкг/л. В работе нами проанализирована отдельно группа тяжелых (ТРЗЭ) и легких (ЛРЗЭ) редкоземельных элементов, а также по отдельности группа скважин, находящихся в I-й очереди (скважины № 8, 9, 11, 13, 29, 40, 45, 48, 66, 68, 77) и III-й очереди (скважины № 128, 144, 151, 159, 168, 175, 183) водозабора.

В соответствии с этим делением были построены графики суммарного распределения РЗЭ, а также ЛРЗЭ и ТРЗЭ по I-й и III-й очередям (рис. 3, 4).

Суммарное значение РЗЭ колеблется от 0,010 до 0,053 мкг/л (I-я очередь) и от 0,018 до 0,065 мкг/л (III-я очередь). В результате по первому графику видна тенденция к увеличению суммарной концентрации РЗЭ с юга на север, при этом концентрация легких РЗЭ находится на одном уровне во всех скважинах, тем самым делаем вывод, что происходит увеличение тяжелых РЗЭ. Концентрация ТРЗЭ увеличилась с 0,002 до 0,035 мкг/л.

По графику, изображенному на рис. 3, видно, что не наблюдается резких изменений суммарных концентраций РЗЭ, ЛРЗЭ и ТРЗЭ за исключением скважины № 144, в которой ΣРЗЭ в 5 раз больше, чем в других скважинах (за счет увеличения

ΣЛРЗЭ). Для уточнения результатов планируется провести режимные наблюдения по данной скважине. На данный момент говорить о причинах отклонения сложно.

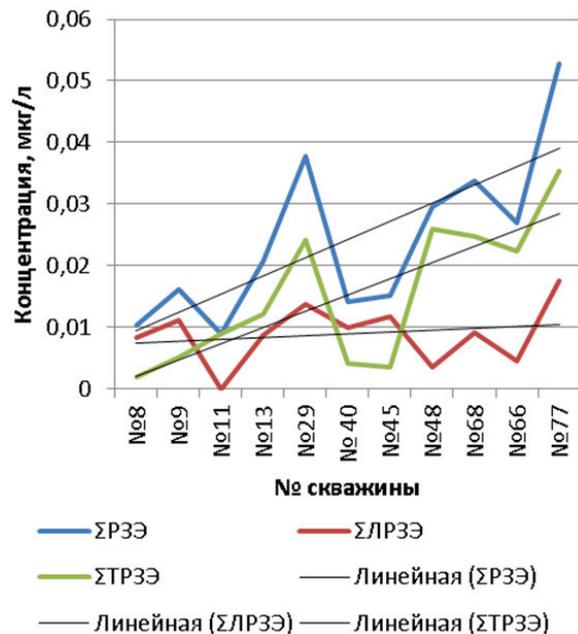


Рис. 3. Суммарное распределение концентраций РЗЭ, ЛРЗЭ и ТРЗЭ по I-й очереди Томского водозабора

Fig. 3. Total distribution of REE, LREE and HREE concentrations on the I stage of the Tomsk water intake

Во всех изученных пробах, которые были отобраны в зимние месяцы (скважины № 11, 29, 48, 66, 68, 77, 128, 144, 151), характерно преобладание тяжелых РЗЭ (за исключением скважины № 144), доля тяжелых от 64 до 84 % от общего состава (рис. 5). В пробах, отобранных в летние месяцы (скважины № 8, 9, 13, 40, 45, 159, 168, 175, 183), преобладают легкие РЗЭ, доля легких от 41 до 81 % от общего состава.

Таблица. Содержание РЗЭ (мкг/л) в подземных водах Томского водозабора

Table. Content of rare-earth elements (REE) (mcg/l) in groundwater of Tomsk water intake

Скважины/Wells	№ 8	№ 9	№ 11	№ 13	№ 29	№ 40	№ 45	№ 48	№ 66
pH	7,82	7,78	7,95	7,76	7,76	7,69	7,54	7,66	7,57
ΣРЗЭ/ΣREE	0,0103	0,0162	0,0089	0,0207	0,0378	0,0141	0,0151	0,0295	0,0270
ΣЛРЗЭ/ΣLREE	0,0084	0,0111	0,0000	0,0087	0,0137	0,0100	0,0116	0,0035	0,0046
ΣТРЗЭ/ΣHREE	0,0019	0,0051	0,0089	0,0121	0,0241	0,0041	0,0035	0,0260	0,0224
ЛРЗЭ/LREE, %	81,7	68,7	0,0	41,7	36,2	71,0	77,0	11,9	17,0
ТРЗЭ/HREE, %	18,3	31,3	100,0	58,3	63,8	29,0	23,0	88,1	83,0
№ TC/TS	№ 68	№ 77	№ 128	№ 144	№ 151	№ 159	№ 168	№ 175	№ 183
pH	7,52	7,26	7,5	6,7	7,2	6,98	7,25	7,45	7,71
ΣРЗЭ/ΣREE	0,0338	0,0529	0,0394	0,3592	0,0646	0,0180	0,0238	0,0262	0,0193
ΣЛРЗЭ/ΣLREE	0,0091	0,0175	0,0118	0,3030	0,0131	0,0104	0,0155	0,0148	0,0090
ΣТРЗЭ/ΣHREE	0,0247	0,0354	0,0276	0,0562	0,0515	0,0076	0,0083	0,0114	0,0103
ЛРЗЭ/LREE, %	26,9	33,1	29,9	84,4	20,3	58,0	65,3	56,5	46,6
ТРЗЭ/HREE, %	73,1	66,9	70,1	15,6	79,7	42,0	34,7	43,5	53,4

LREE – light rare-earth elements; HREE – heavy rare-earth elements

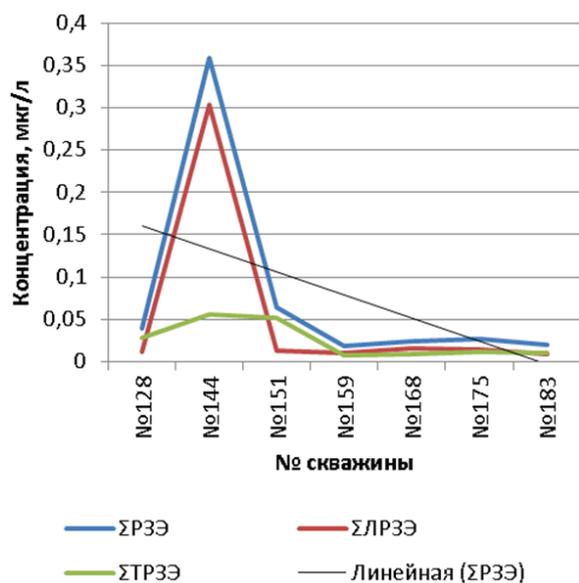


Рис. 4. Суммарное распределение концентраций РЗЭ, ЛРЗЭ и ТРЗЭ по III-й очереди Томского водозабора

Fig. 4. Total distribution of REE, LREE and HREE concentrations on the III stage of the Tomsk water intake

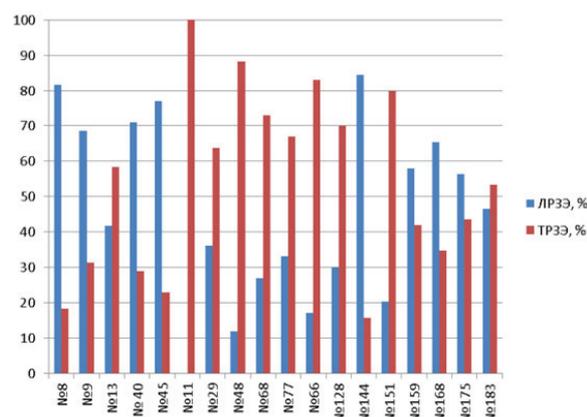


Рис. 5. Распределение легких и тяжелых РЗЭ по скважинам

Fig. 5. Distribution of light and heavy REEs by wells

При таких низких содержаниях вклад РЗЭ в солевой состав вод мизерный, тем не менее можно проследить связь между минерализацией и суммой РЗЭ (рис. 6). На графике выделяются три поля точек: с минерализацией 250–300, 400–450, 500–600 мг/л, в пределах которых наблюдается прямая связь минерализации и концентрации РЗЭ, как легких, так и тяжелых.

В целом низкие содержания РЗЭ в подземных водах свидетельствуют о неблагоприятных гидрогеоэкологических условиях для их накопления в растворе. Согласно анализу профиля распределения редкоземельных элементов, представленному на рис. 7, во всех скважинах, отобранных в зимние месяцы, наблюдается аномалия европия. Европий способен в щелочной среде образовывать трудно растворимые и малоподвижные соединения, которые при окислении выпадают в осадок, что закономерно отражается в снижении его концентрации в

растворе. Однако в рассматриваемых водах наблюдается иной характер поведения этого элемента. Причину подобного поведения европия объяснить весьма сложно [16].

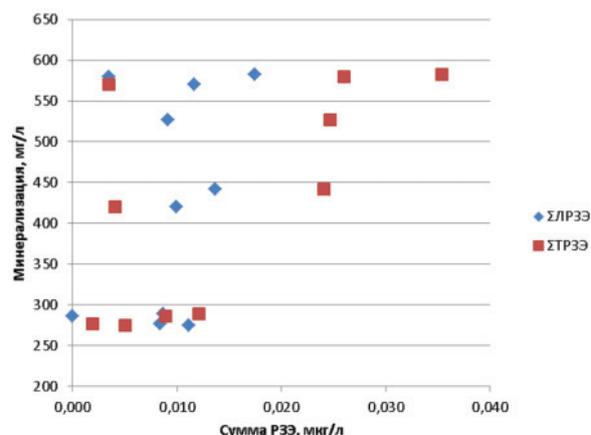


Рис. 6. Зависимость суммы легких и тяжелых РЗЭ (мкг/л) от общей минерализации (мг/л)

Fig. 6. Dependence of the sum of light and heavy REE (mcg/l) on total mineralization (mg/l)

Также в скважине № 144 наблюдаются аномалии церия (Ce) и неодима (Nd). Так называемая положительная цериевая аномалия связана с тем, что у церия окислительно-сорбционный механизм накопления. Это единственный элемент из группы редкоземельных элементов, который окисляется в нормальных условиях. Формируемая положительная аномалия Ce указывает на гидрогенные Fe-Mn образования. То же самое можно сказать и об аномалии неодима, его накопление также указывает на Fe-Mn образования [17–20]. На рисунке 7 содержание La, Ce и Nd в скв. 144 существенно выше их содержания в других скважинах, их значения подписаны над столбцами.

В литературе изложено большое количество возможных причин появления аномалий разных редкоземельных элементов [21–26]. На наш взгляд, часто эти аномалии возникают вследствие применения нормировки редкоземельных элементов в исследуемых водах на их содержание в стандартах горных пород – североамериканском сланце, хондрите и т. д. Вместе с тем для нормировки могут быть использованы кларки редкоземельных элементов морских и речных вод. Но если говорить о конкретных источниках поступления РЗЭ в воды, то в идеале для понимания процессов фракционирования РЗЭ в системе вода–порода нормирование нужно проводить по отношению к водовмещающим породам. Это нормирование будет проведено нами в дальнейших работах.

Заключение

Содержания РЗЭ в рассматриваемых водах весьма низкие – от 0,010 до 0,065 мкг/л. Была выявлена тенденция к увеличению суммарной концентрации РЗЭ с юга на север. Кроме этого, выяв-

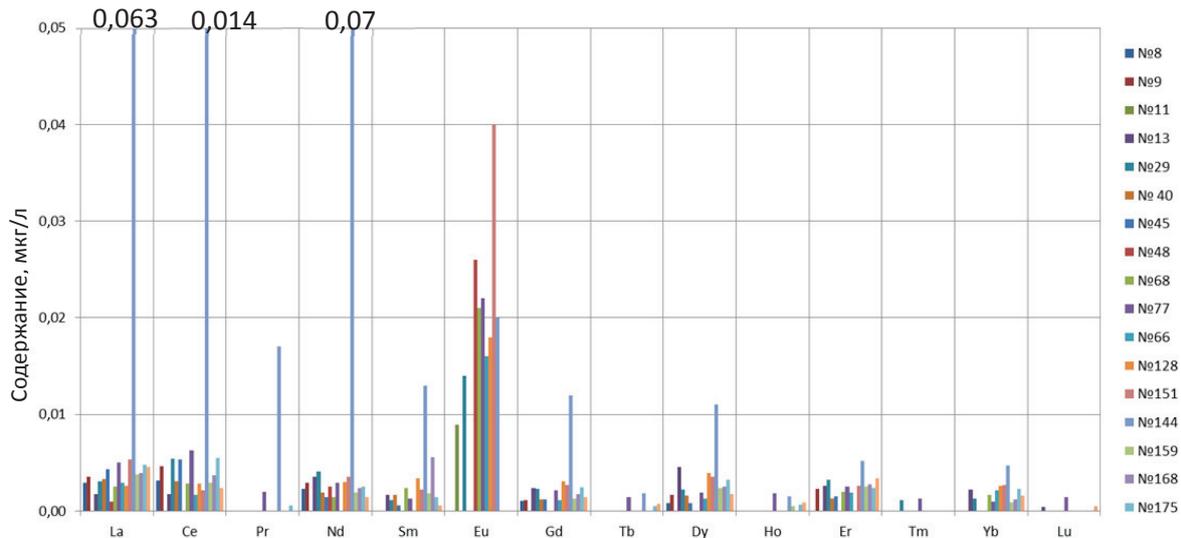


Рис. 7. Распределение редкоземельных элементов в скважинах Томского водозабора

Fig. 7. Distribution profile of rare-earth elements in wells of Tomsk water intake

лены аномалии церия (Ce) и неодима (Nd) в скважине № 144, в ней $\Sigma\text{РЗЭ}$ в 5 раз больше, чем в других скважинах (за счет увеличения $\Sigma\text{ЛРЗЭ}$), что, возможно, указывает на Fe-Mn образования. Также во всех скважинах, отобранных в зимние месяцы, наблюдается аномалия европия.

Уровень концентраций растворенных РЗЭ в подземных водах, вероятней всего, определяется концентрациями РЗЭ в водовмещающих породах, а также особенностями техногенного загрязнения вод.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00429 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Behavior of major and minor elements in a temperate river estuary to the coastal sea / S. Patra, C.Q. Liu, F.S. Wang, S.L. Li, B.L. Wang // International journal of Environmental Science and Technology. – 2012. – V. 9. – P. 647–654.
- Атомно-эмиссионное определение редкоземельных и редких элементов в эколого-геологических объектах с использованием анализатора МАЭС / Н.С. Сафронова, Е.С. Гришанцева, В.Г. Гаранин, Л.П. Федорова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83. – № 1. – С. 57–63.
- Sholkovitz E.R. The aquatic geochemistry of rare earth elements in rivers and estuaries // Aquatic Geochemistry – 1995. – V. 1. – P. 1–34.
- Rare earth contents of high pCO_2 groundwaters of Primorye, Russia: mineral stability and complexation controls / P. Shand, K.H. Johannesson, O. Chudaev, V. Chudaeva, W.M. Edmunds // Rare earth elements in groundwater flow system. / Ed. K. Johannesson. – Netherlands: Springer, 2005. – Ch. 1. – P. 161–186.
- Shannon W.M., Wood S.A. The analysis of pictogram quantities of rare earth elements in natural waters // Rare earth elements in groundwater flow system / Ed. K. Johannesson. – Netherlands: Springer, 2005. – Ch. 1. – P. 1–37.
- Коваль Е.В. Индикаторное значение La/Ce соотношения (на примере изучения природных сред и живых организмов на территории Томской области) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. – Томск, 4–8 апреля 2016. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 2. – С. 157–159.
- Фракционирование редкоземельных элементов в реках Восточного и Южного Сихотэ-Алиня в условиях природных и антропогенных аномалий / О.В. Чудаев, Г.А. Челноков, И.В. Брагин и др. // Тихоокеанская геология. – 2015. – Т. 34. – № 6. – С. 34–44.
- Авандеева О.П. Редкоземельные элементы в чебоксарском водохранилище // Науки о Земле: от теории к практике (Арчи-ковские чтения-2017): материалы Всероссийской молодежной школы-конференции. – Чебоксары, 21–23 ноября 2017. – Чебоксары: ИД «Среда», 2017. – С. 73–82.
- Основной солевой состав и редкоземельные элементы как индикаторы экологического состояния рек Южного Приморья / Е.А. Вах, Г.Ю. Павлова, Т.А. Михайлик, П.Я. Тищенко, П.Ю. Семкин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 39–49.
- Xu Zh., Han G. Rare earth elements (REE) of dissolved and suspended loads in the Xijiang River, South China // Applied geochem. – 2009. – V. 24. – P. 1803–1816.
- Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов I–IV групп: Справ. изд. / под ред. А.Л. Бандман, Г.А. Гудзовский, Л.С. Дубейковская, Б.А. Ивин. – Л.: Химия, 1988. – 512 с.
- Kulaksiz S., Bau M. Rare earth elements in the Rhine river, Germany: First case of anthropogenic lanthanum as a dissolved microcontaminant in the hydrosphere // Environ. Intern. – 2011. – V. 37. – P. 973–979.
- Геохимическая специфика редкоземельных элементов в поверхностных и подземных водах поля Албынского золоторудного месторождения (Амурская область) / В.И. Радомская, С.М. Радомский, Е.Н. Кулик, Л.И. Роголина, Л.П. Шумилова, Л.М. Павлова // Водные ресурсы. – 2016. – Т. 43. – № 6. – С. 648–660.
- Макушин Ю.В. Переоценка эксплуатационных запасов подземных вод томского месторождения // Отчет по договору № 35-нт от 10.11.2005 г.

15. Зуев В.А., Картавых О.В., Шварцев С.Л. Химический состав подземных вод Томского водозабора // Обской вестник. – 1994. – Т. 3/4. – С. 69–77.
16. Баренбойм Г.М., Авандеева О.П., Коркина Д.А. Редкоземельные элементы в водных объектах (экологические аспекты) // Вода: химия и экология. – 2014. – № 5. – С. 42–55.
17. Akagi T., Masuda A. A simple thermodynamic interpretation of Ce anomaly // *Geochem. J.* – 1998. – V. 32. – P. 301–314.
18. Bau M., Koschinsky A. Oxidative scavenging of cerium on hydrous Fe oxide: Evidence from the distribution of rare elements and yttrium between Fe oxide and Mn oxide in hydrogenetic ferromanganese crust // *Geochemical Journal.* – 2009. – V. 43. – P. 37–47.
19. Cerium anomalies in lateritic profiles / J.J. Braun, M. Pagel, J.P. Muller, P. Bilong, A. Michaud, B. Guillet // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1990. – V. 51. – P. 597–605.
20. Adsorption of REE (III)-humate complexes onto MnO₂: Experimental evidence for cerium anomaly and lanthanide tetrad effect suppression / M. Davranche, O. Pourret, G. Gruau, A. Dia, M. Le CozBouhnr // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 2005. – V. 69. – P. 1203–1219.
21. Ronnback R., Astrom M., Gustafsson J.-P. Comparison of the behaviour of rare earth elements in surface waters, overburden groundwaters and bedrock groundwaters in two granitoidic settings, Eastern Sweden // *Applied Geochemistry.* – 2008. – № 23. – P. 1862–1880.
22. Rare earth element content in the SPM of Daliao river system and its comparison with that in the sediments, loess and soils in China / Lin Chunye, He Mengchang, Li Yanxia, Yang Linsheng, Liu Rui-min, Yang Zhifeng // *Journal of rare earths.* – 2008. – № 3. – P. 414–420.
23. Sultan K., Shazili N.A. Rare earth elements in tropical surface water, soil and sediments of the Terengganu River Basin, Malaysia // *Journal of rare earths.* – 2009. – № 6. – P. 1072–1085.
24. Kulaksiz S., Bau M. Contrasting behaviour of anthropogenic gadolinium and natural rare earth elements in estuaries and the gadolinium input into the North Sea // *Earth and Planetary Science Letters.* – 2007. – № 260. – P. 361–371.
25. Steinmann M., Stille P. Controls on transport and fractionation of the rare earth elements in stream water of a mixed basaltic-granitoid catchment basin (Massif Central, France) // *Chemical Geology.* – 2008. – № 254. – P. 1–18.
26. Competitive binding of REE to humic acid and manganese oxide: Impact of reaction kinetics on development of cerium anomaly and REE adsorption / M. Davranche, O. Pourret, G. Gruau, A. Dia, D. Jin, D. Gaertner // *Chemical Geology.* – 2008. – № 247. – P. 154–170.

Поступила 16.03.2018 г.

Информация об авторах

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

Пасечник Е.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Проценко П.И., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Гончаров О.Ю., начальник цеха водоснабжения ООО «Томскводоканал».

UDC 556.314.6:546.65:628.113(571.16)

RARE EARTH ELEMENT CONTENT IN GROUNDWATER OF TOMSK WATER INTAKE

Viktor K. Popov¹,
pvk@tpu.ru

Elena Yu. Pasechnik¹,
paseyu@yandex.ru

Polina I. Protsenko¹,
p.i.petrova@mail.ru

Oleg Yu. Goncharov²,
goncharov@vodokanal.tomsk.ru

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

² LTD «Tomskvodokanal»,
2, Vodozabornaya street, Tomsk, 634021, Russia.

The relevance. Rare earth elements are indicators groundwater ecological status and can be used in monitoring system for water bodies. Thus, the relevance of the problem is determined by the poor knowledge of the mechanism and nature of rare earth elements behavior in underground waters of the Tomsk water intake.

The main aim of the research is to determine the main regularities of changes in concentrations and distribution of rare earth elements in the wells of Tomsk water intake.

Objects. The work is based on the results of hydrogeochemical testing of 18 wells of the Tomsk water intake in the 1st and 3rd stages.

Methods. The concentration of rare earth elements was determined by a mass spectrometric method with inductively coupled plasma.

Results. The authors have studied the distribution of rare earth elements in underground waters of the Tomsk water intake. The levels of concentration of rare earth elements in the studied waters are extremely low (mcg/l). A tendency was found to increase the total concentration of rare earth elements from the south to the north. A distinctive feature of the studied waters is the presence of a positive europium anomaly. This is observed in samples taken during the winter months. In addition, anomalies of cerium (Ce) and neodymium (Nd) in well no. 144 (due to an increase in Σ LREE) were revealed. The reasons for the appearance of these anomalies are discussed.

Key words:

Underground waters, Tomsk water intake, rare earth elements, geochemistry of water, distribution regularities.

The research was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 16–35–00429 мол. а.

REFERENCES

1. Patra S., Liu C.Q., Wang F.S., Li S.L., Wang B.L. Behavior of major and minor elements in a temperate river estuary to the coastal. *International journal of Environmental Science and Technology*, 2012, vol. 9, pp. 647–654.
2. Safronova N.S., Grishantseva E.S., Garanin V.G., Fedorova L.P. Atomic Emission Determination of Rare Earth and Trace Elements in Ecological and Geological Samples Using MAES Analyzer. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2017, vol. 83, no. 1, pp. 57–63. In Rus.
3. Sholkovitz E.R. The aquatic geochemistry of rare earth elements in rivers and estuaries. *Aquatic Geochemistry*, 1995, vol. 1, pp. 1–34.
4. Shand P., Johannesson K.H., Chudaev O., Chudaeva V., Edmunds W.M. Rare earth contents of high pCO₂ groundwaters of Primorye, Russia: mineral stability and complexation controls. *Rare earth elements in groundwater flow system*. Ed. by K. Johannesson. Netherlands, Springer, 2005. Ch. 1, pp. 161–186.
5. Shannon W.M., Wood S.A. The analysis of pictogram quantities of rare earth elements in natural waters. *Rare earth elements in groundwater flow system*. Ed. by K. Johannesson. Netherlands, Springer, 2005. Ch. 1, pp. 1–37.
6. Koval E.V. Indikatornoe znachenie La/Ce sootnosheniya (na primere izucheniya prirodnykh sred i zhivykh organizmov na territorii Tomskoy oblasti) [Indicator value of La/Ce ratio (based on the study of natural environments and living organisms in the Tomsk region)]. *Problamy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XX Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 120-letiyu so dnya osnovaniya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Problems of geology and exploration. Proc. of the 20th International Scientific Symposium of students, postgraduates and young scientists devoted to the 120th Anniversary of the founding of Tomsk Polytechnic University]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2016. Vol. 2. pp. 157–159.
7. Chudaev O.V., Chelnokov G.A., Bragin I.V. Fractionation of rare-earth elements in the Eastern and Southern Sikhote-Alin rivers in conditions of natural and anthropogenic anomalies. *Pacific Geology*, 2015, vol. 34, no. 6, pp. 34–44. In Rus.
8. Avandeeva O.P. Redkozemelnye element v cheboksarskom vodokhranilishche [Rare earth elements in Cheboksary reservoir]. *Nauki o zemle: ot teorii k praktike (Archikovskie chteniya-2017). Materialy Vserossiyskoy molodezhnoy shkoly-konferentsii* [Earth sciences: from theory to practice (Archikov's readings-2017): materials of the All-Russian Youth School-Conference. Cheboksary, November 21–23, 2017. Cheboksary, Sreda Publ. House, 2017. pp. 73–82.
9. Vakh E.A., Pavlova G.Yu., Mikhaylik T.A., Tishchenko P.Ya., Semkin P.Yu. Basic salt composition and rare earth elements as indicators of ecological state of the rivers of southern Primorye.

- Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 39–49.
10. Xu Zh., Han G. Rare earth elements (REE) of dissolved and suspended loads in the Xijiang River, South China. *Applied geochem.*, 2009, vol. 24, pp. 1803–1816.
 11. *Vrednye khimicheskie veshchestva. Neorganicheskie soedineniya elementov I–IV grupp. Spravochnoe izdanie* [Harmful chemicals. Inorganic compounds of elements of Groups I-IV: Ref. ed.]. Eds. A.L. Bandman, G.A. Gudzyovskiy, L.S. Dubeykovskaya, B.A. Ivin. Leningrad, Khimiya Publ., 1988. 512 p.
 12. Kulaksiz S., Bau M. Rare earth elements in the Rhine river, Germany: First case of anthropogenic lanthanum as a dissolved microcontaminant in the hydrosphere. *Environ. Intern.*, 2011, vol. 37, pp. 973–979.
 13. Radomskaia V.I., Radomskii S.M., Kulik E.N., Rogulina L.I., Shumilova L.P., Pavlova L.M. Geochemical features of rare-earth elements in surface and subsurface waters in the field of the Albynskoe gold-bearing placer, Amur oblast. *Water Resources*, 2016, vol. 43, no. 6, pp. 648–660. In Rus.
 14. Makushin Yu.V. *Pereotsenke ekspluatatsionnykh zapasov podzemnykh vod tomского mestorozhdeniya. Otchet po dogovoru № 35-nt ot 10.11.2005 g.* [Reassessment of operational reserves of underground waters of the Tomsk deposit. Report on the contract no. 35-nt, 10.11.2005].
 15. Zuev V.A., Kartavykh O.V., Shvartsev S.L. Khimichesky sostav podzemnykh vod Tomskogo vodozabora [Chemical composition of underground waters of the Tomsk groundwater water intake]. *Obshchaya i prikladnaya khimiya*, 1994, vol. 3/4, pp. 69–77.
 16. Barenboim G.M., Avandaeva O.P., Korkina D.A. Rare earth elements in water bodies (ecological aspects). *Water: chemistry and ecology*, 2014, no. 5, pp. 42–55. In Rus.
 17. Akagi T., Masuda A. A simple thermodynamic interpretation of Ce anomaly. *Geochemical Journal*, 1998, vol. 32, pp. 301–314.
 18. Bau M., Koschinsky A. Oxidative scavenging of cerium on hydrous Fe oxide: Evidence from the distribution of rare elements and yttrium between Fe oxide and Mn oxide in hydrogenetic ferromanganese crust. *Geochemical Journal*, 2009, vol. 43, pp. 37–47.
 19. Braun J.J., Pagel M., Muller J.P., Bilong P., Michaud A., Guillet B. Cerium anomalies in lateritic profiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, vol. 51, pp. 597–605.
 20. Davranche M., Pourret O., Gruau G., Dia A., Le CozBouhnr M. Adsorption of REE (III)-humate complexes onto MnO₂: Experimental evidence for cerium anomaly and lanthanide tetrad effect suppression. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, vol. 69, pp. 1203–1219.
 21. Ronnback R., Astrom M., Gustafsson Jon-P. Comparison of the behaviour of rare earth elements in surface waters, overburdened groundwaters and bedrock groundwaters in two granitoidic settings, Eastern Sweden. *Applied Geochemistry*, 2008, no. 23, pp. 1862–1880.
 22. Lin Chunye, He Mengchang, Li Yanxia, Yang Linsheng, Liu Ruimin, Yang Zhifeng. Rare earth element content in the SPM of Daliao river system and its comparison with that in the sediments, loess and soils in China. *Journal of rare earths*, 2008, no. 3, pp. 414–420.
 23. Sultan K., Shazili N.A. Rare earth elements in tropical surface water, soil and sediments of the Terengganu River Basin, Malaysia. *Journal of rare earths*, 2009, no. 6, pp. 1072–1085.
 24. Kulaksiz S., Bau M. Contrasting behaviour of anthropogenic gadolinium and natural rare earth elements in estuaries and the gadolinium input into the North Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, no. 260, pp. 361–371.
 25. Steinmann M., Stille P. Controls on transport and fractionation of the rare earth elements in stream water of a mixed basaltic-granitic catchment basin (Massif Central, France). *Chemical Geology*, 2008, no. 254, pp. 1–18.
 26. Davranche M., Pourret O., Gruau G., Dia A., Jin D., Gaertner D. Competitive binding of REE to humic acid and manganese oxide: Impact of reaction kinetics on development of cerium anomaly and REE adsorption. *Chemical Geology*, 2008, no. 24, pp. 154–170.

Received: 16 March 2018.

Information about the authors

Viktor K. Popov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena Yu. Pasechnik, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Polina I. Protsenko, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Oleg Yu. Goncharov, head of the water supply department, LTD «Tomskvodokanal».

УДК 665.6–405: (543.2+543.4+543.57+543.54+543.51)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НЕРАСТВОРИМЫХ ПРОДУКТОВ АВТОКЛАВНОГО ТЕРМОЛИЗА СМОЛ И АСФАЛЬТЕНОВ УСИНСКОЙ НЕФТИ

Антипенко Владимир Родионович¹,
avr@ipc.tsc.ru

Гринько Андрей Алексеевич²,
grinko@tpu.ru

Головко Анатолий Кузьмич¹,
Golovko@ipc.tsc.ru

Меленевский Василий Николаевич³,
vmelenevsky@yandex.ru

¹ Институт химии нефти СО РАН,
Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 4.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30.

³ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

Актуальность исследования обусловлена тем, что термическая деструкция является одним из самых распространенных процессов переработки нефтяных остатков, тяжелых нефтей и природных битумов. Использование таких технологий приводит не только к новообразованию дистиллятных фракций за счет деструкции высокомолекулярных компонентов сырья, но всегда сопровождается образованием нерастворимых в нефтяной среде продуктов карбонизации, обычно называемых коксом. Некоторые процессы переработки нефти целенаправленно используются для получения кокса. Считается, что основными коксогенами являются смолисто-асфальтеновые вещества. Различные варианты термической деструкции смол и асфальтенов широко используются для изучения их молекулярного строения. Изучение состава и свойств нерастворимых продуктов, образовавшихся при термическом воздействии на смолисто-асфальтеновые вещества, позволит получить информацию о путях их образования. Природа нерастворимых продуктов термодеструкции смол и асфальтенов при относительно низких температурах (160...250 °С) практически не изучена.

Цель исследования: сравнительная характеристика состава и свойств нерастворимых продуктов, полученных при разных температурах автоклавного термоллиза смол и асфальтенов усинской нефти в инертной атмосфере.

Объекты: смолы и асфальтены тяжелой, высокосернистой, высокосмолистой нефти Усинского месторождения, нерастворимые в хлороформе продукты их автоклавного термоллиза в атмосфере аргона при температурах 250, 450 и 650 °С.

Методы: автоклавный термоллиз в атмосфере аргона, экстракция, анализ элементного состава, ИК- и КР-спектроскопия, пиролитический анализ в варианте «Rock-Eval», флэш-пиролиз (600 °С, 20 с) с анализом летучих продуктов в режиме «on-line» методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектором.

Результаты. Представлены результаты изучения нерастворимых продуктов, полученных при автоклавном термоллизе смол и асфальтенов нефти Усинского месторождения в атмосфере аргона и температурах 160...650 °С. Нерастворимые в хлороформе продукты термоллиза, полученные с высоким выходом из смол тяжелой высокосернистой усинской нефти при 250 °С, существенно отличаются от нерастворимых продуктов, полученных из смол и асфальтенов при 450 и 650 °С. По элементному составу, ИК-спектрам и спектрам комбинационного рассеяния, результатам пиролитического анализа в режиме Rock Eval и «on line» флэш-пиролиза (600 °С, 20 с) они соответствуют «асфальтеноподобным» веществам. Их образование, по-видимому, обусловлено разрывом при 250 °С наиболее лабильных S–S или C–S связей в молекулах смол с генерацией и последующей рекомбинацией макрорадикалов. Термодеструкция этих веществ при более высоких температурах (450 и 650 °С) сопровождается образованием более карбонизированных коксообразных продуктов.

Ключевые слова:

Усинская нефть, смолы, асфальтены, автоклавный термоллиз, нерастворимые продукты, выделение, анализ.

Введение

Термическое воздействие на тяжелые высокосмолистые нефти, нефтяные остатки, природные битумы приводит не только к образованию дополнительного количества дистиллятных фракций за счет деструкции высокомолекулярных компонентов (смол и асфальтенов). В то же время оно всегда сопровождается образованием нерастворимых в нефтяной среде и ароматических растворителях

продуктов карбонизации, обычно называемых коксом. Причем некоторые процессы термической переработки нефти целенаправленно используются для получения кокса [1, 2]. Считается, что основными коксогенами являются смолисто-асфальтеновые вещества (САВ). Изучение состава и свойств нерастворимых продуктов, полученных при термическом воздействии на САВ позволит получить информацию о путях их образования. Экс-

перименты по термолиту САВ проводятся в растворах и в массе, как правило, при температурах от 300–350 до 600 °С [3–25]. Хотя было известно, что выделенные из нефти асфальтены или их фракции «плавятся» с разложением при более низких температурах (от 160 до 300 °С) [26]. Установлено [27], что процессы изменения структуры смол и асфальтенов наблюдаются уже при относительно «мягком» термическом воздействии. Показано [9], что образование нерастворимых продуктов при термолите асфальтенов в токе инертного газа начинается уже при температурах около 200 °С. Если в [3, 4] информация о нерастворимых продуктах была ограничена только их выходом на исходный объект и элементным анализом, то в более поздних публикациях [5–25] использовался широкий набор инструментальных методов исследования.

В работах [28–32] показано, что при термической деструкции смол и асфальтенов нефти Усинского месторождения в автоклаве в атмосфере аргона при температурах 160...650 °С образуется набор продуктов, включающий газы, масла, смолы, асфальтены и нерастворимые в хлороформе и горячем бензоле продукты, условно названные нами коксом. Особенности состава ароматических углеводородов и сероорганических соединений масел, полученных из смол и асфальтенов при различных температурах, описаны в [29–31]. Были также охарактеризованы так называемые «вторичные» смолы и асфальтены, выделенные из жидких продуктов термолита [28, 32]. Информация о нерастворимых продуктах термолита сводится к их выходу на исходный объект.

Целью данной работы является сравнительная характеристика состава и свойств нерастворимых продуктов, полученных при разных температурах автоклавного термолита смол и асфальтенов усинской нефти в инертной атмосфере.

Экспериментальная часть

Термолит смол (СО) и асфальтенов (А0) усинской нефти проводили в течение 1 ч в стальном реакторе объемом 12 см³ в атмосфере аргона при температурах 160, 200, 250, 300, 450, 650 °С. По окончании процесса реактор охлаждали проточной водой. Из реактора отбирали газ. Затем реактор вскрывали, мальтены из продуктов термолита экстрагировали гексаном, асфальтены хлороформом. Нерастворимый остаток именовали коксом.

Нерастворимые продукты термолита были взвешены и охарактеризованы методами элементного анализа, ИК- и КР-спектроскопии, пиролического анализа в варианте «Rock-Eval» и сочетания флэш-пиролиза (600 °С, 20 с) с анализом летучих продуктов в режиме «on-line» методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектором (ГХ-МС). ИК-спектры регистрировали с помощью ИК-Фурье спектрометра «NICOLET 5700» в области 400...4000 см⁻¹. Образцы кокса смешивали с КВг в соотношении кокс/бромид калия 2/300 (мг/мг) и прессовали в таблетки. Дальнейшую об-

работку ИК-спектров проводили с использованием программного обеспечения «OMNIC 7.2» Thermo Nicolet Corporation. Спектры КР света регистрировали на ИК-Фурье спектрометре Nicolet 5700 с Rampan модулем. Длина волны возбуждающего лазера 1064 нм. Спектры измеряли с разрешением 4 см⁻¹ и количеством сканов 2400.

Пиролический анализ в варианте «Rock Eval» [33] проводили на пиролизаторе SR Analyzer™ (Humble Instruments & Services, Inc.) с использованием следующей температурной программы нагрева: изотерма (150 °С) в течение 3 мин, затем линейный нагрев со скоростью 25 °С/мин до 580 °С и выдержка при этой температуре в течение 1 мин.

Флэш-пиролиз всех образцов проводили при 600 °С в течение 20 с. Используемая температура соответствует по данным «Rock-Eval»-анализа завершению термической деструкции образца. Образцы загружали в кварцевую трубочку диаметром 2 мм, находящуюся внутри спирали из платиновой проволоки. Пиролическая ячейка (CDS 1500, Valved interface) присоединялась непосредственно к инжектору газового хроматографа, что позволяло проводить анализ летучих продуктов в режиме «on-line». Условия ГХ-МС-анализа летучих продуктов подробно описаны в [34]. Сбор и обработку данных в режиме SCAN производили с помощью программы ChemStation. Оценку относительного содержания различных типов соединений в летучих продуктах флэш-пиролиза проводили на основе определения суммарной площади идентифицированных пиков различных типов соединений в их масс-хроматограммах.

Результаты и их обсуждение

Как следует из рис. 1, выход кокса (КА) из асфальтенов в интервале температур термолита 160...300 °С незначителен и резко возрастает только при 450 и 650 °С. Для смол характерна совершенно другая картина: образование кокса (КС) с достаточно высоким выходом наблюдается уже при температурах 160...300 °С. Так же как и для асфальтенов, выход резко возрастает при 450 и 650 °С. В обоих случаях эффект резкого увеличения выхода кокса наблюдается при температурах, которые по данным пиролического анализа этих образцов [32, 34] соответствуют максимальной скорости разложения образца (450 °С) и температуре завершения его деструкции (650 °С). Причины высокого выхода кокса из смол при явно более низких температурах (160...300 °С) могут быть выяснены при изучении его состава и свойств.

По результатам элементного анализа атомные отношения (Н/С)_{ат} и (S/С)_{ат} для нерастворимых продуктов практически всегда ниже, чем в исходных СО (1,35), (0,42) и А0 (0,96), (0,60). Они постепенно снижаются с увеличением температуры термолита, достигая минимальных значений для образцов кокса, полученных при 650 °С. При этом КС250 близки по (Н/С)_{ат}=1,06 к асфальтенам (0,96). Образцы кокса, полученные из смол и асфальтенов при 650 °С

(КС650, КА650), близки между собой по $(H/C)_{ат}=(0,29; 0,28)$ и $(S/C)_{ат}=(0,18; 0,23)$.

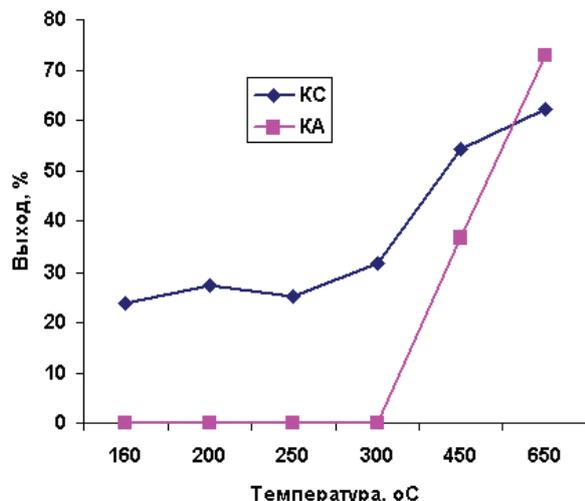


Рис. 1. Выход нерастворимых продуктов при термолитзе смол и асфальтенов при различных температурах

Fig. 1. Yield of insoluble products at resin and asphaltene thermolysis at various temperatures

Явно более высокое отношение $(S/C)_{ат}$ в КА450 (1,25) по сравнению с КС450 (0,37) может быть обусловлено балансом относительного содержания в исходных С0 и А0 различных типов сернистых соединений, имеющих по данным [35] различную термическую устойчивость. В самом деле, наименее термически устойчивыми являются алифатические сульфиды. Такие соединения практически полностью распадаются при 450 °С. Соединения, содержащие атом серы в цикле (тиацикланы), устойчивы вплоть до 650 °С. Ароматические серосодержащие соединения (бензотиофен, дибензотиофен, нафтобензотиофены и др.) являются самыми термически стойкими: тиофен стабилен до 800 °С, бензотиофен и дибензотиофен являются еще более стабильными. Как видно из данных в табл. 1, в исходных смолах преобладает алкилсульфидная сера, а в исходных асфальтенах – тиациклановая. Поэтому в КС450 $(S/C)_{ат}$ ниже, чем в С0, а в КА450 выше, чем в А0. Для образцов кокса, полученных при 650 °С, $(S/C)_{ат}$ имеет близкое минимальное значение, так как определяется только относительным содержанием ароматической (тиофеновой) серы.

Таблица 1. Содержание различных типов серы в САВ усинской нефти, % отн.

Table 1. Contents of various types of sulfur in the resin-asphaltene substances (RAS) from the Usinskaya oil, % rel.

Образец Sample	Алкилсульфидная Alkylsulfide	Тиациклановая Thiacyclane	Ароматическая Aromatic
С0	53,54	17,35	29,12
А0	25,80	42,20	32,00

Методика определения относительного содержания различных типов серы представлена в [32].

Procedure for determining the relative contents of different types of sulfur is described in [32].

ИК-спектры изученных образцов заметно отличаются. Показано, что только нерастворимые продукты, полученные из смол при 250 °С (КС250), содержат в ИК-спектрах полосы валентных и деформационных колебаний С–Н связей в алифатических структурных фрагментах (2800...3000, 1370, 1450, 720 см⁻¹), наряду с полосами, соответствующими наличию в образце ароматических (3050, 1615, 870, 807, 744 см⁻¹) и кислородсодержащих (3430, 1690 см⁻¹) структурных фрагментов [36, 37]. В ИК-спектрах нерастворимых продуктов, полученных при температурах 450 и 650 °С (КС450, КА450, КС650, КА650), полосы валентных и деформационных колебаний С–Н связей в алифатических структурных фрагментах отсутствуют. Это находится в соответствии со значением атомного отношения Н/С (см. выше), которое резко снижается при увеличении температуры термолитза, что позволяет определить продукты, полученные при 450 и 650 °С, как более карбонизированные.

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) достаточно широко используется для изучения особенностей строения углеродных материалов [38–41] и тяжелых нефтяных фракций [42]. Основное внимание при этом уделяется наличию и соотношению интенсивности полос в области 1350 и 1580 см⁻¹, именуемых D и G-полоса, соответственно. Считается, что для идеально чистого монокристаллического (высокоупорядоченного) графита характерно наличие только G-полосы. Появление и увеличение относительной интенсивности полосы D отражает увеличение степени разупорядоченности в углеродном материале. Среди изученных нами образцов наличие полос D и G характерно для нерастворимых продуктов, полученных из смол и асфальтенов при 450 и 650 °С. КС250 проявляет флуоресценцию в условиях регистрации КР-спектра, что дает основание отнести его к асфальтеноподобным веществам [42]. Известно, что применение спектроскопии КР для характеристики тяжелых и остаточных фракций нефтей, обогащенных САВ, неэффективно из-за сильного флуоресцентного фона.

Пиролитический анализ, в том числе в варианте Rock Eval, широко применяется для характеристики нерастворимого органического вещества осадочных пород [18, 19, 23, 32–34, 43–47], битумидов и их смолисто-асфальтеновых компонентов. Считается, что до температуры 250...300 °С выделяются органические соединения, присутствующие в образце в свободном, адсорбированном или связанном лабильными химическими связями состоянии (пик S1). При температурах от 300 до 650 °С происходит термическая деструкция органического вещества (пик S2).

Из пирогамм образцов кокса, полученных при термолитзе смол и асфальтенов, (рис. 2), видно, что для всех образцов, аналогично исходным смолам и асфальтенам [32, 34], характерно наличие пика в низкотемпературной области (150...200 °С), указывающего на наличие в них низкомолекулярных ор-

ганических соединений. Что, в свою очередь, указывает на захват низкомолекулярных продуктов термоллиза в нерастворимый продукт термоллиза при формировании его структуры. Наличие в структуре кокса жидких включений соответствует существующим представлениям о нем как о дисперсной системе [1]. Образование структур «масло в коксе» наблюдалось в [48] при крекинге асфальтенов при 430 °С, что обусловлено инверсией фаз среди продуктов термоллиза. По мнению авторов [48], при увеличении объема фазы кокса вероятность инверсии фаз возрастает. Содержание таких соединений, как следует из табл. 2, во всех образцах невелико и за исключением КС250 соизмеримо с выходом летучих продуктов, образующихся при более высоких температурах (250...600 °С) пиролитического анализа.

Таблица 2. Результаты Rock-Eval анализа исходных образцов и нерастворимых продуктов их термоллиза при различных температурах

Table 2. Data of Rock-Eval analysis of the initial samples and insoluble products of their thermolysis at different temperatures

Образец/Sample	S1, мг/г/mg/g	S2, мг/г/mg/g	T _{max} , °С
С0	60,0	730,0	428
А0	20,0	315,0	438
КС250	4,7	346,6	434
КС450	6,4	7,7	300, >580
КА450	1,3	4,2	300, >580
КС650	0,4	0,8	295, 408
КА650	0,3	0,5	295, 408

S1 – выход летучих органических соединений при 150...250 °С; S2 – выход летучих продуктов термической деструкции образца при 250...600 °С; T_{max} – температуры максимальной скорости разложения образца.

S1 is the yield of volatile organic compounds at 150...250 °С; S2 is the yield of volatile products of thermal destruction of the sample at 250...600 °С; T_{max} are the temperatures of the maximum decomposition rate of the sample.

Пирограммы кокса, полученного из смол и асфальтенов при одинаковой температуре (450 или 650 °С), схожи между собой. В пирограммах КС650 и КА650 кроме упомянутого выше пика в области 150–200 °С присутствуют два пика в области 295 и 408 °С. В КС450 и КА450 кроме низкотемпературного пика присутствует пик в области 300 °С. Восходящий характер пирограммы указанных образцов в области температур выше 500 °С свидетельствует о том, что в составе КС450 и КА450 содержатся высококонденсированные структуры с T_{max}, превышающей максимальную температуру анализа (580 °С) [46]. Для КС250 кроме низкотемпературного пика присутствует только один интенсивный пик в области 434 °С, что очень похоже на поведение в условиях Rock Eval анализа неразделенных асфальтенов и смол усинской нефти, а также их отдельных фракций [32, 34].

Как видно на рис. 2 и в табл. 2, по результатам пиролитического анализа образец КС250 явно выпадает из общего ряда. Как и другие образцы кок-

са, он содержит низкомолекулярные соединения, присутствующие в образце в свободном или адсорбированном состоянии (пик в низкотемпературной области пирограммы на рис. 2). Но в отличие от них при более высоких температурах генерирует в сотни раз больше летучих продуктов деструкции. При сравнении параметров пиролитического анализа образцов в табл. 2 можно сделать вывод, что КС250 по своему генерационному потенциалу и T_{max} близок к асфальтенам А0, хотя получен из смол при 250 °С.

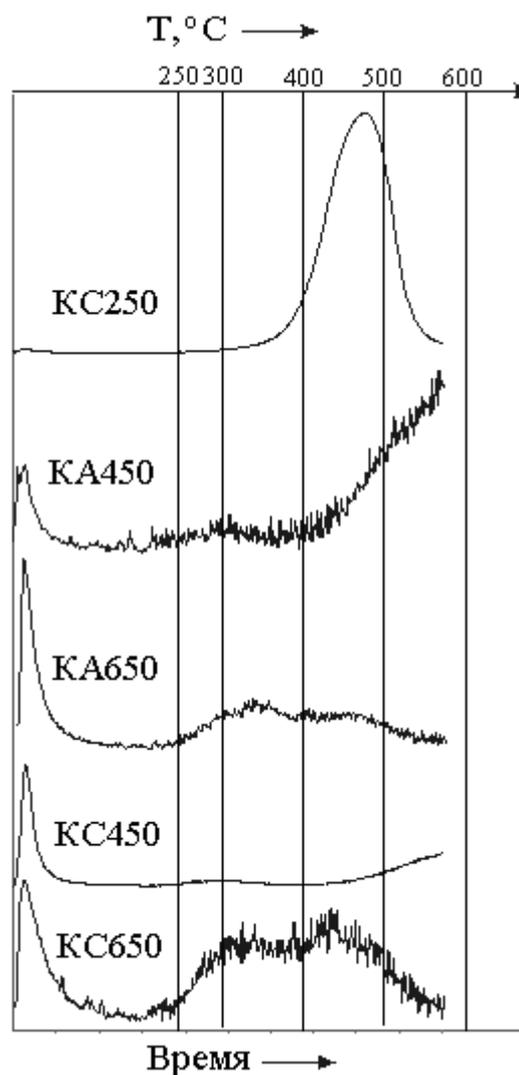


Рис. 2. Rock-Eval пирограммы нерастворимых продуктов термоллиза смол и асфальтенов, полученных при различных температурах

Fig. 2. Rock-Eval pyrograms of insoluble products of resin and asphaltene thermolysis obtained at different temperatures

Высокий по сравнению с другими образцами генерационный потенциал КС250 позволил нам методом ГХ-МС проанализировать состав летучих продуктов его флэш-пиролиза и сопоставить его с составом летучих продуктов флэш-пиролиза исходного образца смол (С0) и образца, имеющего близкие значения параметров пиролитического

анализа (А0). Результаты анализа летучих продуктов смол, асфальтенов усинской нефти, а также их отдельных фракций ранее были представлены в [34]. Относительное содержание различных типов соединений в летучих продуктах флэш-пиролиза смол, асфальтенов усинской нефти и полученного из смол кокса приведено в табл. 3.

Как видно в табл. 3, летучие продукты флэш-пиролиза КС250 содержат полный набор соединений, характерный для летучих продуктов флэш-пиролиза асфальтенов и смол [34]. Среди них преобладают соединения алифатического характера – алканы и алкены. В сумме с алкилбензолами они составляют ~85–90 % от идентифицированных соединений. Содержание соединений ароматического характера уменьшается с увеличением числа конденсированных колец в их молекулах.

Таблица 3. Относительное содержание (% на сумму идентифицированных) различных типов соединений в летучих продуктах флэш-пиролиза смол, асфальтенов усинской нефти и полученного из смол нерастворимого продукта

Table 3. Relative contents (% on the sum of identified) of different types of compounds in volatile products of flash pyrolysis of resins, asphaltenes from the Usinskaya oil and resin-derived insoluble product

Образец Sample	Алканы Alkanes	Алкены Alkenes	АЦГ/АЧ AlC/ACh	(Г+Х) (H+Ch)	(Ст+Пр) (St+Pr)	АБ/АВ AB/AB	Н/Н N/N	(Ф+А) (P+A)	БТ/(ВТ) BT/(BT)	ДБТ (DBT)
С0	29,2	38,1	1,8	0,2	0,1	22,8	2,3	0,8	4,0	0,8
КС250	30,7	24,6	1,0	0,2	0,3	29,4	3,8	1,5	7,4	1,1
А0	34,9	36,0	1,5	0,1	0,2	20,2	2,0	0,8	3,6	0,8

АЦГ – алкилциклогексаны; (Г+Х) – гопаны+хейлантаны; (Ст+Пр) – стераны+прегнаны; АБ – сумма моно-, би-, три- и тетразамещенных бензолов; Н – сумма нафталинов; (Ф+А) – сумма фенантронов и антраценов; БТ – сумма моно-, би- и тризамещенных бензотиофенов; ДБТ – дибензотиофены.

АЧН – alkylcyclohexanes; (H+Ch) – hopanes+cheilanthanes; (St+Pr) – steranes+pregnanes; AB – sum of mono-, bi-, tri- and tetrasubstituted benzenes; N – sum of naphthalenes; (P+A) – sum of phenanthrenes and anthracenes; BT – sum of mono-, bi- and trisubstituted benzothiophenes; DBT – dibenzothiophenes.

Тем не менее летучие продукты флэш-пиролиза КС250 отличаются от летучих продуктов флэш-пиролиза А0 и С0 относительным содержанием таких идентифицированных типов соединений, как алкены и сумма алканов и алкенов (их заметно меньше) и ароматических структур, в том числе серосодержащих (их заметно больше). Это означает, что резерв для образования перечисленных структур в одном случае уменьшается (алканы, алкены), а в другом – увеличивается (ароматические соединения). В частности, это может быть обусловлено уменьшением алифатичности «асфальтеноподобных» КС250 при разрыве сульфидных мостиков, содержащихся в периферийных заместителях молекул исходных смол. Алифатические структурные фрагменты смол, содержащие сульфидную серу, в условиях низкотемпературного термолита по реакции $RCH_2CH_2-S-K \rightarrow RCH=CH_2+HS-K$ (где К – конден-

сированный ароматический блок молекулы) должны изменять свою первоначальную структуру, превращаясь в олефины, а в ароматическом структурном блоке исходной молекулы должна появиться тиольная группа. Такой механизм образования термогенных α -олефинов, идентифицированных в нефтях и экстрактах осадочных пород, был предложен в работе [49]. Взаимосвязь относительного содержания сульфидной серы во фракциях смол и асфальтенов усинской нефти и содержания алкенов в летучих продуктах их флэш-пиролиза была установлена в [34]. Как установлено в работе [50], для асфальтенов скорость их крекинга коррелирует с содержанием алифатической сульфидной серы, а выход кокса – с их ароматичностью.

Как показано ниже, отличия между КС250, А0 и С0 наблюдаются не только по относительному содержанию упомянутых типов соединений, но и по групповому и индивидуальному составу однотипных соединений, полученных при флэш-пиролизе этих трех образцов. В частности (рис. 3), в случае КС250 максимум молекулярно-массового распределения алканов сдвигается в область низких молекулярных масс (от 11–13 до 9–11). Среди гопанов отсутствуют ненасыщенные структуры (гопены состава C_{27} и C_{30}), существенно возросло относительное содержание гопана состава C_{27} . Можно предположить, что при флэш-пиролизе смол и асфальтенов гопены, подобно α -олефинам, образуются при разрыве С–S связи в алкилсульфидной цепи, связывающей пентациклический нафтеновый фрагмент с другими фрагментами их молекул. Разрыв сульфидных мостиков в условиях низкотемпературного термолита смол исключает этот маршрут образования гопенов из КС250 при его флэш-пиролизе и также приводит к резкому увеличению относительного содержания гопана состава C_{27} .

Как видно на рис. 4, в летучих продуктах флэш-пиролиза А0 и С0 основное содержание в составе моноциклических ароматических углеводородов – производных бензола – приходится на одинаковый набор соединений состава C_7-C_{11} с явным преобладанием 1,2,3,4-тетраметилбензола (C_{10}), являющегося основным продуктом термической деструкции высокомолекулярных гомологов 1-алкил-2,3,6-триметилбензола [51]. Реконструкция масс-хроматограмм отдельно по характеристическим ионам с m/z 91, 105, 119 и 133 свидетельствует также о наличии среди н-алкилбензолов, алкилтолуолов, алкилсилолов и алкилтриметилбензолов гомологов вплоть до $C_{20}-C_{25}$ в малых концентрациях. Преобладание низкомолекулярных гомологов алкилбензолов в летучих продуктах флэш-пиролиза изученных САВ и КС250, скорее всего, обусловлено более глубоким (дальнейшим) крекингом алкилбензолов, образующихся при разрыве алкильных цепей, связывающих бензольное кольцо с другими структурными фрагментами в молекулах САВ и в структуре КС250 с преимущественным разрывом С–С-связи в β -положении.

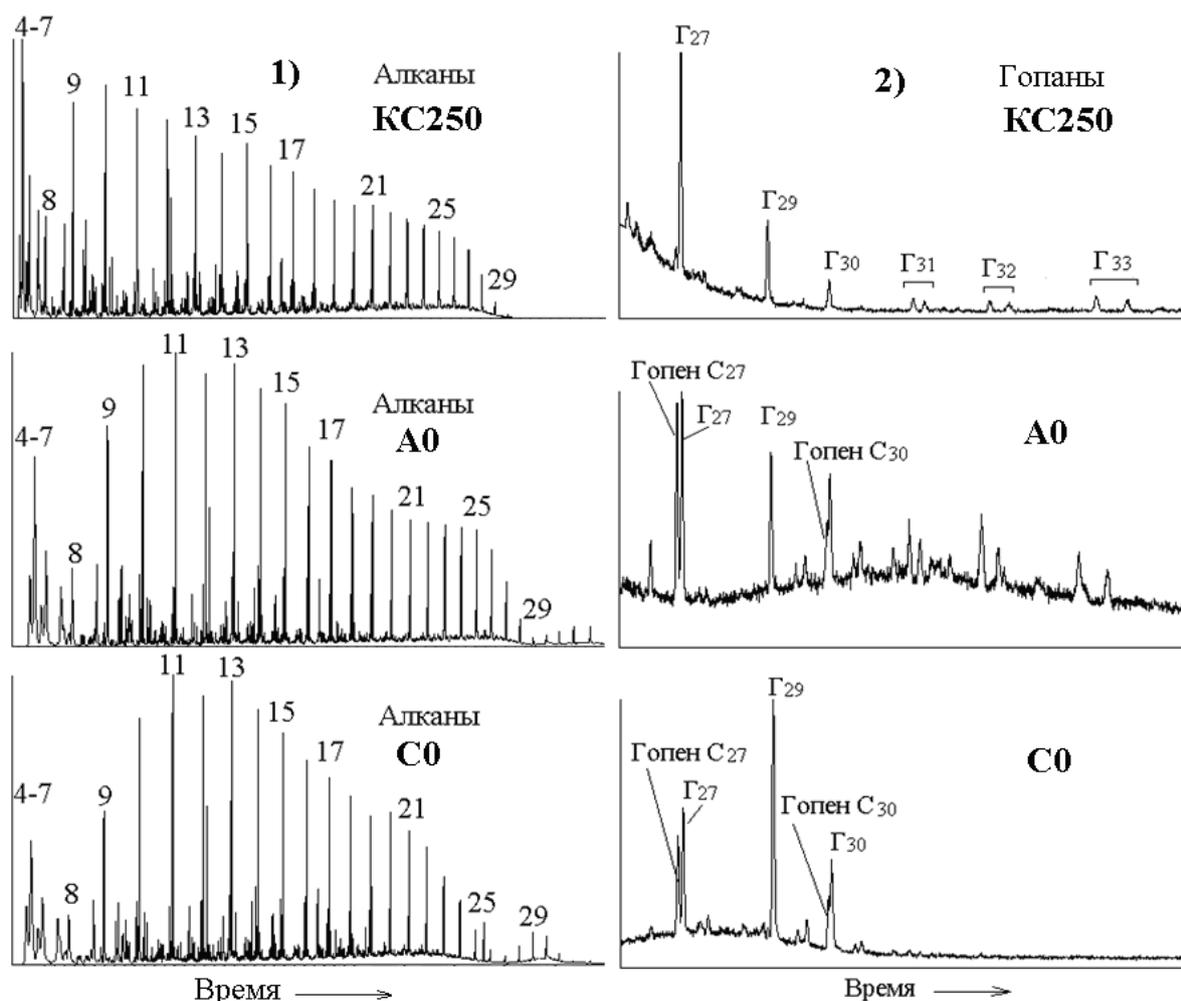


Рис. 3. Масс-хроматограммы летучих продуктов флэш-пиролиза KC250, A0, C0 по характеристическим ионам: 1) алканов (m/z 57); 2) гопанов (m/z 191)

Fig. 3. Mass chromatograms of volatile products of KC250, A0 and C0 flash pyrolysis by characteristic ions of: 1) alkanes (m/z 57); 2) hopanes (m/z 191)

В ряду C0, A0, KC250 наблюдается резкое увеличение доли низкомолекулярных (C_7 – C_9) гомологов моноциклических ароматических углеводородов – производных бензола (рис. 4).

Обратная картина характерна для би- и трициклических ароматических углеводородов (рис. 4), а также дибензотиофенов. Заметных отличий в составе бензотиофенов не наблюдается.

Совокупность данных об особенностях состава и свойств нерастворимых продуктов, полученных из асфальтенов и смол в процессе их автоклавного термоллиза при различных температурах, позволяет высказать предположения об их природе. Достаточно очевидно, что все нерастворимые продукты, полученные при термоллизе смол и асфальтенов при 450 и 650 °С, близки по своему составу и свойствам к коксу. У них низкое атомное отношение Н/С (0,59; 0,29 и 0,78; 0,28 для продуктов, полученных из смол и асфальтенов, соответственно). В ИК-спектрах этих продуктов отсутствуют полосы, соответствующие валентным и деформацион-

ным колебаниям С–Н связей в алифатических структурных фрагментах. Спектры комбинационного рассеяния этих продуктов содержат полосы, характерные для углеродных материалов с высокой степенью разупорядоченности. Их пиролитический анализ в варианте Rock Eval свидетельствует о низком нефтегенерационном потенциале, то есть способности генерировать летучие органические вещества при пиролизе.

В то же время нерастворимый продукт, полученный при термоллизе смол при 250 °С, по всем перечисленным выше показателям состава и свойств нельзя отнести к коксу. У него близкое к смолам и асфальтенам атомное отношение Н/С (1,06). Его ИК-спектр похож на ИК-спектр асфальтенов усинской нефти. Спектр комбинационного рассеяния KC250 невозможно зарегистрировать из-за сильного флуоресцентного фона.

При термической деструкции в условиях пиролитического анализа в варианте Rock Eval KC250 по сравнению с коксами, полученными из

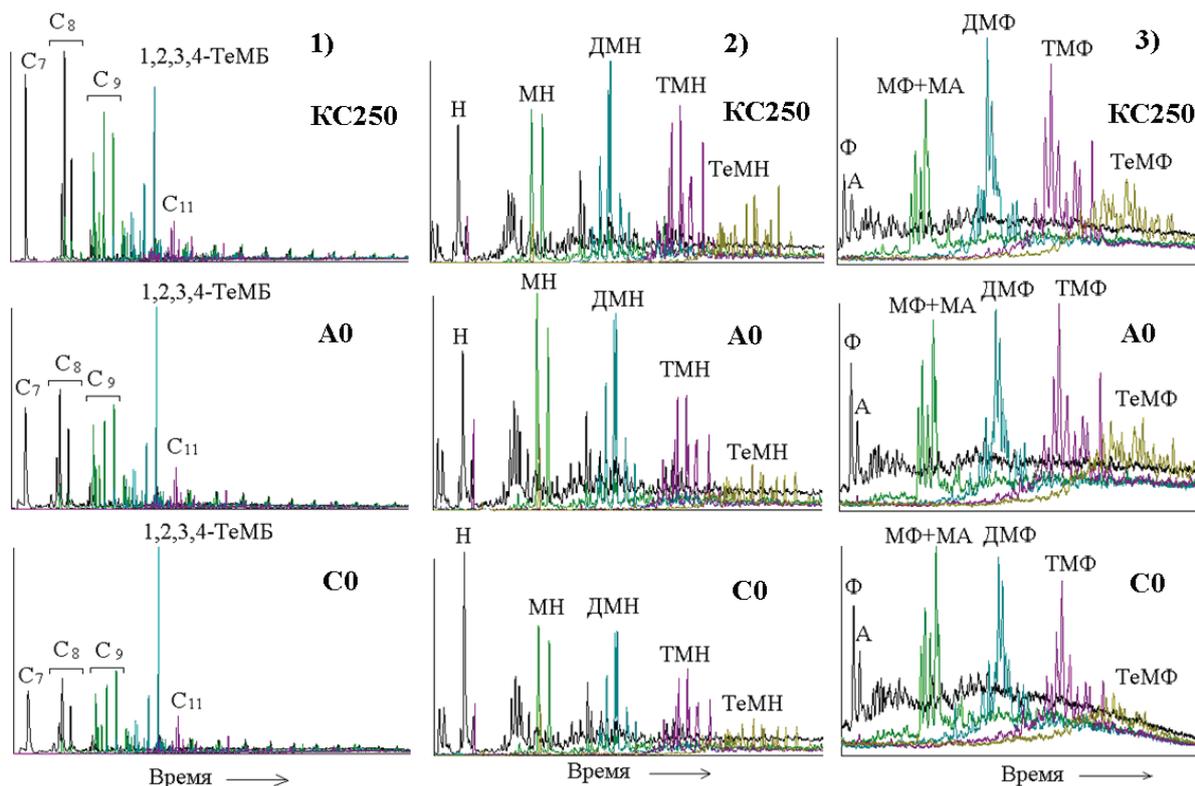


Рис. 4. Масс-хроматограммы летучих продуктов флэш-пиролиза KC250, A0, C0 по характеристическим ионам: 1) алкилбензолов: m/z 91+92 (черный), 105+106 (зеленый), 119+120 (синий), 133+134 (фиолетовый); 2) нафталинов (m/z 128+142+156+170+184); 3) фенантронов (m/z 178+192+206+220+234)

Fig. 4. Mass chromatograms of volatile products of KC250, A0 and C0 flash pyrolysis by characteristic ions of: 1) alkylbenzenes: m/z 91+92 (black), 105+106 (green), 119+120 (blue), 133+134 (violet); 2) naphthalenes (m/z 128+142+156+170+184); 3) phenanthrenes (m/z 178+192+206+220+234)

САВ усинской нефти при 450 и 650 °С, генерирует в сотни раз больше летучих органических продуктов. При сравнении параметров пиролизического анализа образцов установлено, что KC250 по своему генерационному потенциалу и T_{max} близок к асфальтену, выделенным из усинской нефти. Поэтому KC250 можно рассматривать как «асфальтеноподобные» вещества, образование которых происходит на низкотемпературной стадии термолитического разложения смол путем разрыва наиболее лабильных S–S или C–S связей в их молекулах. Наличие связанных через сульфидные мостики фрагментов в молекулах САВ, в том числе в САВ усинской нефти, доказано в многочисленных работах [52–59]. Отрыв этих структурных фрагментов, находящихся, скорее всего, на периферии конденсированного ароматического или нафтеноароматического структурного блока молекул смол, объясняет наличие среди продуктов низкотемпературного термолитического разложения масел (5,22 %). Сульфидный мостик может находиться и в полиметиленовой цепи, связывающей структурные блоки молекул между собой. Образовавшиеся при низкотемпературном термолитическом разложении макрорадикалы либо стабилизируются при взаимодействии с водородным или низкомолекулярным алифатическим радикалами, образуя вторичные смолы

(62,88 %), либо рекомбинируют между собой, что приводит к образованию, в зависимости от баланса в них ароматических и алифатических структурных фрагментов, асфальтенов (5,49 %) и «асфальтеноподобных» нерастворимых продуктов (25,17 %). Рекомбинация наименее активных радикалов, образующихся при деструкции исходных смол, рассматривалась в [3] как один из механизмов образования асфальтенов или «асфальтеноподобных» веществ. На существенную роль реакций макрорадикалов в образовании нерастворимых продуктов при термолитическом разложении смол и асфальтенов указывалось в работах [18–20, 60]. Термодеструкция САВ при более высоких температурах (450 и 650 °С) сопровождается разрывом более устойчивых C–O и C–C связей в алифатических и нафтеновых фрагментах, что ведет к резкому увеличению ароматичности их молекул и образованию более карбонизированных коксообразных продуктов.

Заключение

Нерастворимые в горячем бензоле и хлороформе продукты автоклавного термолитического разложения в атмосфере аргона, полученные с высоким выходом из смол тяжелой высокосернистой усинской нефти при 250 °С, существенно отличаются от нерастворимых

продуктов, полученных из смол и асфальтенов при 450 и 650 °С. По элементному составу, ИК-спектрам и спектрам комбинационного рассеяния, результатам пиролитического анализа в режиме Rock Eval и «on line» флэш-пиролиза (600 °С, 20 с) они соответствуют «асфальтеноподобным» веществам, образование которых, по-видимому, об-

условлено разрывом при 250 °С наиболее лабильных S–S или C–S связей в смолах с генерацией макрорадикалов и последующей их рекомбинацией. Дальнейшая термодеструкция этих веществ при более высоких температурах (450 и 650 °С) сопровождается образованием более карбонизированных коксообразных продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сюняев З.И. Производство, обогащение и применение нефтяного кокса. – М.: Химия, 1973. – 295 с.
2. Капустин В.М., Глаголева О.Ф. Физико-химические аспекты формирования нефтяного кокса (обзор) // Нефтехимия. – 2016. – Т. 56. – № 1. – С. 3–12.
3. Магарил Р.З., Аксенова Э.И., Корзун Н.В. Исследование термических превращений нефтяных смол // Известия Высших Учебных заведений. Нефть и газ. – 1966. – № 9. – С. 63–68.
4. Магарил Р.З., Рамзаева Л.Ф. Исследование коксообразования при термическом разложении асфальтенов в растворах // Известия Высших Учебных заведений. Нефть и газ. – 1969. – № 1. – С. 61–64.
5. Speight J.G. Thermal cracking of Athabasca bitumen, Athabasca asphaltenes and Athabasca deasphalted heavy oil // Fuel. – 1970. – V. 49. – № 2. – P. 134–145.
6. Moschopedis S.E., Parkash S., Speight J.G. Thermal decomposition of asphaltenes // Fuel. – 1978. – V. 57. – № 7. – P. 431–434.
7. Ritchie R.G.S., Roche R.S., Steedman W. Pyrolysis of Athabasca tar sands: analysis of the condensable products from asphaltene // Fuel. – 1979. – V. 58. – № 7. – P. 523–530.
8. Savage P.E., Klein M.T., Kukes S.G. Asphaltene reaction pathways. 1. Thermolysis // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. – 1985. – V. 24. – № 4. – P. 1169–1174.
9. Спейт Дж. Термические превращения асфальтенов // Нефтехимия. – 1989. – Т. 29. – № 6. – С. 723–730.
10. Wiehe I.E. A phase-separation kinetic model for coke formation // Ind. Eng. Chem. Res. – 1993. – V. 32. – № 11. – P. 2447–2454.
11. Martinez M.T., Benito A.M., Callejas M.A. Thermal cracking of coal residues: Kinetics of asphaltene decomposition // Fuel. – 1997. – V. 76. – № 9. – P. 871–877.
12. Calemna V., Rausa R.J. Thermal decomposition behavior and structural characteristics of asphaltenes // Anal. Appl. Pyrolysis. – 1997. – V. 40–41. – P. 569–584.
13. Zhao Y., Gray M.R., Chung K.H. Molar kinetics and selectivity in cracking of Athabasca asphaltenes // Energy and Fuels. – 2001. – V. 15. – № 3. – P. 751–755.
14. Gray M.R., McCaffrey M.C. Role of chain reactions and olefin formation in cracking, hydroconversion, and coking of petroleum and bitumen fractions // Energy and Fuels. – 2002. – V. 16. – № 3. – P. 756–766.
15. Gray M.R. Consistency of asphaltene chemical structures with pyrolysis coking behavior // Energy and Fuels. – 2003. – V. 17. – № 6. – P. 1566–1569.
16. Asphaltene molecular structure and Chemical Influences on the Morphology of Coke Produced in Delayed Coking / M. Siskin, S.R. Kelemen, C.P. Eppig, L.D. Brown, M. Afeworki // Energy and Fuels. – 2006. – V. 20. – № 3. – P. 1227–1234.
17. Investigation of asphaltene chemical structural modification induced by thermal treatments / S. Chiaberge, G. Guglielmetti, L. Montanari, M. Salvalaggio, L. Santolini, S. Spera, P. Cesti // Energy and Fuels. – 2009. – V. 23. – № 9. – P. 4486–4495.
18. Thermogravimetric Analysis Studies on the Thermal Stability of Asphaltenes: Pyrolysis Behavior of Heavy Oil Asphaltenes / A. Hauser, D. Bahzad, A. Stanislaus, M. Behbahani // Energy and Fuels. – 2008. – V. 22. – № 1. – P. 449–454.
19. Trejo F., Rana M.S., Ancheyta J. Thermogravimetric determination of coke from asphaltenes, resins and sediments and coking kinetics of heavy crude asphaltenes // Catalysis Today. – 2010. – V. 150. – № 3–4. – P. 272–278.
20. Zhao Y., Wei F., Yu Y. Effects of reaction time and temperature on carbonization in asphaltene pyrolysis // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2010. – V. 74. – P. 20–25.
21. Каюкова Г.П., Киямова А.М., Романов Г.В. Гидротермальные превращения асфальтенов // Нефтехимия. – 2012. – Т. 52. – № 1. – С. 7–16.
22. Akmaz S., Gurkaynak M.A., Yasar M. The effect of temperature on the molecular structure of Raman asphaltenes during pyrolysis // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2012. – V. 96. – P. 139–145.
23. Pyrolysis of asphaltenes in an atmospheric entrained flow reactor: a study on char characterization / N. Mahapatra, V. Kurian, B. Wang, F. Martens, R. Gupta // Fuel. – 2015. – V. 152. – P. 29–37.
24. Barneto A.G., Carmona J.A., Garrido M.J.F. Thermogravimetric assessment of thermal degradation in asphaltenes // Thermochimica Acta. – 2016. – V. 627–629. – P. 1–8.
25. Coking propensity during hydroprocessing of vacuum residues, deasphalted oils, and asphaltenes / R. Prajapati, K. Kohli, S.K. Maity, M.O. Garg // Fuel. – 2017. – V. 203. – P. 514–521.
26. Антипенко В.Р., Титов В.И. Выделение и характеристика асфальтенов нефтей Западной Сибири // Нефтехимия. – 1974. – Т. 14. – № 4. – С. 507–511.
27. Копытов М.А., Головки А.К. Изменения структурно-групповых характеристик смол и асфальтенов тяжелых нефтей в процессе первичной перегонки // Нефтехимия. – 2017. – Т. 57. – № 1. – С. 41–48.
28. Гринько А.А., Головки А.К. Исследование стабильности нефтяных асфальтенов методом термической деструкции // Химия в интересах устойчивого развития. – 2011. – Т. 19. – № 3. – С. 327–334.
29. Ароматические серосодержащие структурные фрагменты смол и асфальтенов тяжелого углеводородного сырья / А.А. Гринько, Р.С. Мин, Т.А. Сагаченко, А.К. Головки // Нефтехимия. – 2012. – Т. 52. – № 4. – С. 249–255.
30. Структурные фрагменты макромолекул смол и асфальтенов тяжелых нефтей / А.А. Гринько, Р.С. Мин, Т.А. Сагаченко, А.К. Головки // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2012. – № 4. – С. 24–29.
31. Состав ароматических углеводородов продуктов термолитического разложения смол и асфальтенов тяжелого углеводородного сырья / А.А. Гринько, Р.С. Мин, Т.А. Сагаченко, А.К. Головки // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – Т. 20. – № 2. – С. 205–209.
32. Гринько А.А., Головки А.К. Термолитическое разложение нефтяных асфальтенов и их фракций // Нефтехимия. – 2014. – Т. 54. – № 1. – С. 43–48.
33. Peters K. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis // American Association of Petroleum Geologists Bulletin. – 1986. – V. 70. – № 3. – P. 318–329.
34. Антипенко В.Р., Гринько А.А., Меленевский В.Н. Состав продуктов аналитического пиролиза фракций смол и асфальтенов

- усинской нефти // Нефтехимия. – 2014. – Т. 54. – № 3. – С. 176–185.
35. Воронков М.Г., Дерягина Э.Н. Термические превращения органических соединений двухвалентной серы // Успехи химии. – 2000. – Т. 69. – № 1. – С. 90–104.
36. Глебовская Е.А. Применение инфракрасной спектроскопии в нефтяной геохимии. – Л.: Недра, 1971. – 140 с.
37. Калугина Н.П. Инфракрасная спектроскопия при геохимических исследованиях нефтей и конденсатов (на примере месторождений Туркменистана). – Ашхабад: Ылым, 1986. – 156 с.
38. Matsumoto T. Mesophase pitch and its carbon fibers // Pure and Appl. Chem. – 1985. – V. 57. – № 11. – P. 1553–1562.
39. Америк Ю.Б., Платэ Н.А. Глубокая конверсия тяжелых нефтяных фракций через мезоморфные структуры // Нефтехимия. – 1991. – Т. 31. – № 3. – С. 355–378.
40. Rogovoi V.N., Amerik Y.B. Raman scattering study of mesophase pitch // Vibrational spectroscopy. – 1993. – V. 4. – № 2. – P. 167–173.
41. Öner F.O., Yürüm A., Yürüm Y. Structural characterization of semicokes produced from the pyrolysis of petroleum pitches // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2015. – V. 111. – P. 15–26.
42. Купцов А.Х., Арбузова Т.В. Исследование тяжелых фракций нефти методом Фурье-спектроскопии КР ближнего ИК-диапазона // Нефтехимия. – 2011. – Т. 51. – № 3. – С. 214–222.
43. Лопатин Н.В., Емец Т.П. Пиролиз в нефтегазовой геохимии. – М.: Наука, 1987. – 144 с.
44. Конторович А.Э., Меленевский В.Н., Борисова Л.С. Диагностика асфальтенов рассеянного органического вещества и нефтей пиролитическим методом // Докл. АН СССР. – 1988. – Т. 302. – № 3. – С. 700–703.
45. Меленевский В.Н. Методические рекомендации по применению пиролитического метода в органической геохимии. – Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 1991. – 48 с.
46. Меленевский В.Н., Борисова Л.С., Тимошина И.Д. Пиролитическая характеристика твердых битумов ряда кериты-антракосолиты // Геология нефти и газа. – 2008. – № 4. – С. 40–45.
47. Диагенетическая трансформация органического вещества голоценовых осадков Черного моря по данным пиролиза / В.Н. Меленевский, С.В.Сараев, Е.А. Костырева, В.А. Каширцев // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 2. – С. 273–289.
48. Liquid-Phase Behavior during the Cracking of Asphaltenes / S. Rahmani, W. McCaffrey, J.A.W. Elliott, M.R. Gray // Ind. Eng. Chem. Res. – 2003. – V. 42. – № 17. – P. 4101–4108.
49. Смирнов М.Б., Полудеткина Е.Н., Ванюкова Н.А. Непредельные углеводороды термокаталитического генезиса в некоторых нефтях и битумоидях юга Анадырского бассейна // Нефтехимия. – 2010. – Т. 50. – № 3. – С. 202–210.
50. Coking Kinetics of Asphaltenes as a Function of Chemical Structure / S. Rahmani, W.C. McCaffrey, H.D. Dettman, M.R. Gray // Energy and Fuel. – 2003. – V. 17. – № 4. – P. 1048–1056.
51. Source of 1,2,3,4-tetramethylbenzene in asphaltenes from the Tarim Basin / W. Jia, P. Peng, C. Yu, Z. Xiao // Journal of Asian Earth Sciences. – 2007. – V. 30. – № 3. – P. 591–598.
52. Molecular Structure of Athabasca Asphaltene: Sulfide, Ether, and Ester Linkages / P. Peng, A. Morales-Izquierdo, A. Hogg, O.P. Strausz // Energy and Fuels. – 1997. – V. 11. – № 6. – P. 1171–1187.
53. Additional Structural Details on Athabasca Asphaltene and Their Ramifications / O.P. Strausz, T.W. Mojelsky, F. Faraji, E.M. Lown, P. Peng // Energy and Fuels. – 1999. – V. 13. – № 2. – P. 207–227.
54. Chemical structure and biomarker content of Jinghan asphaltenes and kerogens / P. Peng, A. Morales-Izquierdo, E.M. Lown, O.P. Strausz // Energy and Fuels. – 1999. – V. 13. – № 2. – P. 248–265.
55. Состав «серосвязанных» фрагментов в молекулах смолисто-асфальтеновых веществ и сернистых соединений в маслах тяжелой нефти месторождения Усинское / Е.Ю. Коваленко, Р.С. Мин, Т.А. Сагаченко, В.П. Сергун, Т.В. Чешкова, С.С. Яновская // Химический журнал Казахстана. – 2015. – № 3 (51). – С. 290–296.
56. Чешкова Т.В., Сагаченко Т.А., Мин Р.С. Состав серо- и кислородсодержащих структурных фрагментов макромолекул смол нефти Усинского месторождения // Технологии нефти и газа. – 2015. – № 2. – С. 18–21.
57. Структурные фрагменты, содержащие сульфидные и эфирные связи в молекулах высоко- и низкомолекулярных асфальтенов тяжелой нефти месторождения Усинское / В.П. Сергун, Т.В. Чешкова, Т.А. Сагаченко, Р.С. Мин // Нефтехимия. – 2016. – Т. 56. – № 1. – С. 13–18.
58. Состав и строение смолистых компонентов тяжелой нефти месторождения Усинское / Т.В. Чешкова, Е.Ю. Коваленко, Н.Н. Герасимова, Т.А. Сагаченко, Мин Р.С. // Нефтехимия. – 2017. – Т. 57. – № 1. – С. 33–40.
59. Химический состав нефти Крапивинского месторождения (сообщение 3) / В.П. Сергун, Т.В. Чешкова, Т.А. Сагаченко, Р.С. Мин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 228–247.
60. Америк Ю.Б. Проявление макромолекулярной природы асфальтенов в реакциях деструкции, аддиционной и конденсационной полимеризации // Нефтехимия. – 1995. – Т. 35. – № 3. – С. 228–247.

Поступила 09.10.2017 г.

Информация об авторах

Антипенко В.Р., доктор химических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти СО РАН.

Гринько А.А., кандидат химических наук, научный сотрудник Международной научно-образовательной лаборатории изучения углерода арктических морей Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Головко А.К., доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией углеводородов и высокомолекулярных соединений нефти Института химии нефти СО РАН.

Меленевский В.Н., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 665.6–405: (543.2+543.4+543.57+543.54+543.51)

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF INSOLUBLE PRODUCTS OBTAINED BY AUTOCLAVE THERMOLYSIS OF RESINS AND ASPHALTENES FROM THE USINSKAYA OIL

Vladimir R. Antipenko¹,

avr@ipc.tsc.ru

Andrey A. Grinko²,

grinko@tpu.ru

Anatoliy K. Golovko¹,

Golovko@ipc.tsc.ru

Vasiliy N. Melenevskiy³,

vmelenevskiy@yandex.ru

¹ Institute of Petroleum Chemistry SB RAS,
4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
3, Akademika Koptyga Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the research is caused by the fact that thermal destruction is one of the most common processes used to refine oil residues, heavy oils and natural bitumen. The use of such technologies promotes the formation of distillate fractions due to destruction of high-molecular components of feedstock and is always accompanied by the formation of oil-insoluble carbonization products, usually called coke. Some processes of oil refining are purposefully used to produce coke. Resin-asphaltene substances are considered as the main coke genes. Various options of resin and asphaltene thermal destruction are widely used to study their molecular structures. The study of the composition and properties of insoluble products obtained by thermal treatment of resin-asphaltene substances will provide information on the ways of their formation. The nature of insoluble products of resin and asphaltene thermal destruction at relatively low temperatures (160...250 °C) has not been studied yet.

The main aim of the research is the comparative study of composition and properties of insoluble products obtained at different temperatures of autoclave thermolysis of resins and asphaltenes from the Usinskaya oil in an inert atmosphere.

Objects: resins and asphaltenes of heavy, high-sulfur and highly resinous oil from the Usinskoye oil field, chloroform-insoluble products of their autoclave thermolysis in an argon atmosphere at 250, 450 and 650 °C.

Methods: autoclave thermolysis in argon atmosphere, extraction, elemental analysis, IR and Raman spectroscopy, «Rock-Eval» pyrolytic analysis, flash pyrolysis (600 °C, 20 s) with «on-line» analysis of volatile products by gas chromatography with a mass-spectrometric detector.

Results. The paper introduces the results on the study of insoluble products obtained at autoclave thermolysis of resins and asphaltenes from the Usinskaya oil in argon atmosphere at 160...650 °C. Chloroform-insoluble thermolysis products obtained with high yield from the resins of heavy high-sulfur oil at 250 °C significantly differ from the insoluble products obtained from resins and asphaltenes at 450 and 650 °C. By elemental composition, IR- and Raman spectra, the results of Rock Eval pyrolytic analysis and «on-line» flash pyrolysis (600 °C, 20 s) they correspond to «asphaltene-like» substances. Their formation is probably due to the breakage at 250 °C of the most labile S-S or C-S bonds in the resin molecules with generation and subsequent recombination of macroradicals. The thermal destruction of these substances at higher temperatures (450 and 650 °C) is accompanied by formation of more carbonized coke-like products.

Key words:

Usinskaya oil, resins, asphaltenes, autoclave thermolysis, insoluble products, isolation, analysis.

REFERENCES

1. Sunyaev Z.I. *Proizvodstvo, oblagorazhivanie i primeneniye neftyanogo koksa* [Production, refining and application of petroleum coke]. Moscow, Khimiya Publ., 1973. 295 p.
2. Kapustin V.M., Glagoleva V.F. Physicochemical Aspects of Petroleum Coke Formation (Review). *Petroleum Chemistry*, 2016, vol. 56, no. 1, pp. 1–9.
3. Magaril R.Z., Aksenova E.I., Korzun N.V. Issledovanie termicheskikh prevrashcheniy neftyanykh smol [The study of thermal conversions of petroleum resins]. *Izvestiya Vysshyykh Uchebnykh zavedeniy. Neft i gaz*, 1966, no. 9, pp. 63–68.
4. Magaril R.Z., Ramzaeva L.F. Issledovanie koksoobrazovaniya pri termicheskom razlozhenii asfaltenov v rastvorakh [Study of coke formation at thermal decomposition of asphaltenes in solutions]. *Izvestiya Vysshyykh Uchebnykh zavedeniy. Neft i gaz*, 1969, no. 1, pp. 61–64.
5. Speight J.G. Thermal cracking of Athabasca bitumen, Athabasca asphaltenes and Athabasca deasphalted heavy oil. *Fuel*, 1970, vol. 49, no. 2, pp. 134–145.
6. Moschopedis S.E., Parkash S., Speight J.G. Thermal decomposition of asphaltenes. *Fuel*, 1978, vol. 57, no. 7, pp. 431–434.
7. Ritchie R.G.S., Roche R.S., Steedman W. Pyrolysis of Athabasca tar sands: analysis of the condensable products from asphaltene. *Fuel*, 1979, vol. 58, no. 7, pp. 523–530.
8. Savage P.E., Klein M.T., Kukes S.G. Asphaltene reaction pathways. 1. Thermolysis. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 1985, vol. 24, no. 4, pp. 1169–1174.

9. Speight J.G. Termicheskie prevrashcheniya asfaltenov [Thermal conversion of asphaltenes]. *Neftekhimiya*, 1989, vol. 29, no. 6, pp. 723–730.
10. Wiehe I.E. A phase-separation kinetic model for coke formation. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1993, vol. 32, no. 11, pp. 2447–2454.
11. Martinez M.T., Benito A.M., Callejas M.A. Thermal cracking of coal residues: Kinetics of asphaltene decomposition. *Fuel*, 1997, vol. 76, no. 9, pp. 871–877.
12. Calemna V., Rausa R.J. Thermal decomposition behavior and structural characteristics of asphaltenes. *Anal. Appl. Pyrolysis*, 1997, vol. 40–41, pp. 569–584.
13. Zhao Y., Gray M.R., Chung K.H. Molar kinetics and selectivity in cracking of Athabaska asphaltenes. *Energy and Fuels*, 2001, vol. 15, no. 3, pp. 751–755.
14. Gray M.R., McCaffrey M.C. Role of chain reactions and olefin formation in cracking, hydroconversion, and coking of petroleum and bitumen fractions. *Energy and Fuels*, 2002, vol. 16, no. 3, pp. 756–766.
15. Gray M.R. Consistency of asphaltene chemical structures with pyrolysis coking behavior. *Energy and Fuels*, 2003, vol. 17, no. 6, pp. 1566–1569.
16. Siskin M., Kelemen S.R., Eppig C.P., Brown L.D., Afeworki M. Asphaltene molecular structure and Chemical Influences on the Morphology of Coke Produced in Delayed Coking. *Energy and Fuels*, 2006, vol. 20, no. 3, pp. 1227–1234.
17. Hauser A., Bahzad D., Stanislaus A., Behbahani M. Thermogravimetric Analysis Studies on the Thermal Stability of Asphaltenes: Pyrolysis Behavior of Heavy Oil Asphaltenes. *Energy and Fuels*, 2008, vol. 22, no. 1, pp. 449–454.
18. Trejo F., Rana M.S., Ancheyta J. Thermogravimetric determination of coke from asphaltenes, resins and sediments and coking kinetics of heavy crude asphaltenes. *Catalysis Today*, 2010, vol. 150, no. 3–4, pp. 272–278.
19. Chiaberge S., Guglielmetti G., Montanari L., Salvalaggio M., Santolini L., Spera S., Cesti P. Investigation of asphaltene chemical structural modification induced by thermal treatments. *Energy and Fuels*, 2009, vol. 23, no. 9, pp. 4486–4495.
20. Zhao Y., Wei F., Yu Y. Effects of reaction time and temperature on carbonization in asphaltene pyrolysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, vol. 74, pp. 20–25.
21. Kayukova G.P., Kiyamova A.M., Romanov G.V. Hydrothermal transformations of asphaltenes. *Petroleum Chemistry*, 2012, vol. 52, no. 1, pp. 5–14.
22. Akmaz S., Gurkaynak M.A., Yasar M. The effect of temperature on the molecular structure of Raman asphaltenes during pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2012, vol. 96, pp. 139–145.
23. Mahapatra N., Kurian V., Wang B., Martens F., Gupta R. Pyrolysis of asphaltenes in an atmospheric entrained flow reactor: a study on char characterization. *Fuel*, 2015, vol. 152, no. 3, pp. 29–37.
24. Barneto A.G., Carmona J.A., Garrido M.J.F. Thermogravimetric assessment of thermal degradation in asphaltenes. *Thermochimica Acta*, 2016, vol. 627–629, pp. 1–8.
25. Prajapati R., Kohli K., Maity S.K., Garg M.O. Coking propensity during hydroprocessing of vacuum residues, deasphalted oils, and asphaltenes. *Fuel*, 2017, vol. 203, pp. 514–521.
26. Antipenko V.R., Titov V.I. Vydelenie i kharakteristika asfaltenov neftey Zapadnoy Sibiri [Isolation and characteristics of asphaltenes from West Siberian oils]. *Neftekhimiya*, 1974, vol. 14, no. 4, pp. 507–511.
27. Kopytov M.A., Golovko A.K. Changes in structural-group characteristics of resins and asphaltenes of heavy oil in the primary distillation process. *Petroleum Chemistry*, 2017, vol. 57, no. 1, pp. 39–47.
28. Grinko A.A., Golovko A.K. Investigation of the stability of oil pyrobitumen by means of thermal destruction. *Chemistry for Sustainable Development*, 2011, vol. 19, no. 3, pp. 303–310.
29. Grin'ko A.A., Min R.S., Sagachenko T.A., Golovko A.K. Aromatic sulfur-containing structural units of resins and asphaltenes in heavy hydrocarbon feedstock. *Petroleum Chemistry*, 2012, vol. 52, no. 4, pp. 221–227.
30. Grinko A.A., Min R.S., Sagachenko T.A., Golovko A.K. Structural fragments of resin and asphaltene macromolecules in heavy oils. *Neftepererabotka i neftekhimiya*, 2012, no. 4, pp. 24–29. In Rus.
31. Grinko A.A., Min R.S., Sagachenko T.A., Golovko A.K. Composition of aromatic hydrocarbons, the pyrolytic products of resins and asphaltenes from heavy crude hydrocarbon feed stock. *Chemistry for Sustainable Development*, 2012, vol. 20, no. 2, pp. 167–171.
32. Grin'ko A.A., Golovko A.K. Thermolysis of petroleum asphaltenes and their fractions. *Petroleum Chemistry*, 2014, vol. 54, no. 1, pp. 42–47.
33. Peters K. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1986, vol. 70, no. 3, pp. 318–329.
34. Antipenko V.R., Grin'ko A.A., Melenevskii V.N. Composition of products of analytical pyrolysis of resin and asphaltene of Usa oil. *Petroleum Chemistry*, 2014, vol. 54, no. 3, pp. 178–186.
35. Voronkov M.G., Deryagina E.N. Thermal transformations of organic compounds of divalent sulfur. *Russ Chem Rev*, 2000, vol. 69, no. 1, pp. 81–94. In Rus.
36. Glebovskaya E.A. *Primenenie infrakrasnoy spektroskopii v nefteyanoy geokhimi* [Application of infrared spectroscopy in petroleum geochemistry]. Leningrad, Nedra Publ., 1971. 140 p.
37. Kalugina N.P. *Infrakrasnaya spektroskopiya pri geokhimiicheskikh issledovaniyakh neftey i kondensatov (na primere mestorozhdeniy Turkmenistana)* [Infrared spectroscopy for geochemical studies of oils and condensates (on the example of Turkmenistan deposits)]. Ashkhabad, Ylym Publ., 1986. 156 p.
38. Matsumoto T. Mesophase pitch and its carbon fibers. *Pure and Appl. Chem.*, 1985, vol. 57, no. 11, pp. 1553–1562.
39. Amerik Yu.B., Plate N.A. Glubokaya konversiya tyazhelykh neftyanykh fraktsiy cherez mezomorfnye struktury [Deep conversion of heavy oil fractions via mesomorphic structures]. *Neftekhimiya*, 1991, vol. 31, no. 3, pp. 355–378.
40. Rogovoi V.N., Amerik Y.B. Raman scattering study of mesophase pitch. *Vibrational spectroscopy*, 1993, vol. 4, no. 2, pp. 167–173.
41. Öner F.O., Yürüm A., Yürüm Y. Structural characterization of semicokes produced from the pyrolysis of petroleum pitches. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2015, vol. 111, pp. 15–26.
42. Kuptsov A.Kh., Arbutova T.V. A study of heavy oil fractions by Fourier-transform near-infrared Raman spectroscopy. *Petroleum Chemistry*, 2011, vol. 51, no. 3, pp. 203–211.
43. Lopatin N.V., Emets T.P. *Pyroliz v neftegazovoy geokhimi* [Pyrolysis in oil and gas geochemistry]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 144 p.
44. Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N., Borisova L.S. Diagnostika asfaltenov rasseyanogo organicheskogo veshchestva i neftey piroliticheskim metodom [Diagnostics of asphaltenes in dispersed organic matter and oil by a pyrolytic method]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1988, vol. 302, no. 3, pp. 700–703.
45. Melenevskiy V.N. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu piroliticheskogo metoda v organicheskoy geokhimi* [Methodical recommendations for application of the pyrolytic method in organic geochemistry]. Novosibirsk, SNIIGGIMS Publ., 1991. 48 p.
46. Melenevskiy V.N., Borisova L.S., Timoshina I.D. Pyrolytic characteristics of hard bitumen of kerite-anthracolite series. *Oil and gas geology*, 2008, no. 4, pp. 40–45. In Rus.
47. Melenevskiy V.N., Saraev S.V., Kostyreva E.A., Kashirtsev V.A. Diagenetic transformation of organic matter of the Holocene Black Sea sediments according to pyrolysis data. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 2, pp. 273–289. In Rus.

48. Rahmani S., McCaffrey W., Elliott J.A.W., Gray M.R. Liquid-Phase Behavior during the Cracking of Asphaltenes. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2003, vol. 42, no. 17, pp. 4101–4108.
49. Smirnov M.B., Poludetkina E.N., Vanyukova N.A. Unsaturated hydrocarbons of thermocatalytic origin in some oils and bitumens from the southern part of Anadyr basin. *Petroleum Chemistry*, 2010, vol. 50, no. 3, pp. 189–199.
50. Rahmani S., McCaffrey W.C., Dettman H.D., Gray M.R. Coking Kinetics of Asphaltenes as a Function of Chemical Structure. *Energy and Fuels*, 2003, vol. 17, no. 4, pp. 1048–1056.
51. Jia W., Peng P., Yu C., Xiao Z. Source of 1,2,3,4-tetramethylbenzene in asphaltenes from the Tarim Basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, vol. 30, no. 3, pp. 591–598.
52. Peng P., Morales-Izquierdo A., Hogg A., Strausz O.P. Molecular Structure of Athabasca Asphaltene: Sulfide, Ether, and Ester Linkages. *Energy and Fuels*, 1997, vol. 11, no. 6, pp. 1171–1187.
53. Strausz O.P., Mojelsky T.W., Faraji F., Lown E.M., Peng P. Additional Structural Details on Athabasca Asphaltene and Their Ramifications. *Energy and Fuels*, 1999, vol. 13, no. 2, pp. 207–227.
54. Peng P., Morales-Izquierdo A., Lown E.M., Strausz O.P. Chemical structure and biomarker content of Jinghan asphaltenes and kerogens. *Energy and Fuels*, 1999, vol. 13, no. 2, pp. 248–265.
55. Kovalenko E.Yu., Min R.S., Sagachenko T.A., Sergun V.P., Cheshkova T.V., Yanovskaya S.S. Composition of sulfur-linked moieties in the molecules of resin-asphaltene substances and sulfur compounds of oily components in heavy oils from the Usinskoye deposit. *Chemical Journal of Kazakhstan*, 2015, no. 3 (51), pp. 290–296. In Rus.
56. Cheshkova T.V., Sagachenko T.A., Min R.S. Composition of sulfur and oxygen-containing structural fragments of resin macromolecules in crude oil from the Usinskoye oil field. *Oil and Gas Technologies*, 2015, no. 2, pp. 18–21. In Rus.
57. Sergun V.P., Cheshkova T.V., Sagachenko T.A., Min R.S. Structural units with sulfur and ether/ester bonds in molecules of high- and low-molecular-weight asphaltenes of Usa heavy oil. *Petroleum Chemistry*, 2016, vol. 56, no. 1, pp. 10–15.
58. Cheshkova T.V., Kovalenko E.Yu., Gerasimova N.N., Sagachenko T.A., Min R.S. Composition and structure of resinous components of heavy oil from Usa oilfield. *Petroleum Chemistry*, 2017, vol. 57, no. 1, pp. 31–38.
59. Sergun V.P., Cheshkova T.V., Sagachenko T.A., Min R.S. Chemical composition of petroleum from Krapivinskoe oilfield (message 3). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 228–247. In Rus.
60. Amerik Yu.B. Proyavlenie makromolekulyarnoy prirody asfal'tonov v reaktsiyakh destrukttsii, additsionnoy i kondensatsionnoy polimerizatsii [The manifestation of the macromolecular nature of asphaltenes in the reactions of destruction, additive and condensation polymerizations]. *Neftekhimiya*, 1995, vol. 35, no. 3, pp. 228–247.

Received: 9 October 2017.

Information about the authors

Vladimir R. Antipenko, Dr. Sc., professor, leading researcher, Institute of Petroleum Chemistry SB RAS.

Andrey A. Grinko, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anatoliy K. Golovko, Dr. Sc., professor, head of the Laboratory, Institute of Petroleum Chemistry SB RAS.

Vasiliy N. Melenevskiy, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

УДК 552.323.6

ТИПИЗАЦИЯ ПЛАТИНОНОСНЫХ ПИКРИТОВ СЕВЕРО-ЗАПАДА КАНСКОГО ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)

Бабинцев Никита Анатольевич¹,
mas9915@mail.ru

Чернышов Алексей Иванович²,
aich@ggf.tsu.ru

¹ ГПКК «Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья»,
Россия, 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 55.

² Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Объектом исследования являются мафит-ультрамафитовые комплексы Кулибинского потенциального рудного узла, включая интрузивные образования кингашского комплекса и метаэффузивы кулижинской и кузьинской толщ; изученные объекты располагаются на северо-западном окончании Канского зеленокаменного пояса в Восточном Саяне.

Цель работы заключается в изучении петрографических, петрохимических и структурных особенностей исследуемых образований для их типизации и разработки критериев выделения рудоносных площадей.

Методы. Петрографическое изучение пород осуществлялось на поляризационном микроскопе AxioScop 40 фирмы Carl Zeiss. Определение петрогенных элементов в породах проводилось в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) и в лаборатории ОАО «Минусинская ГРЭ». Определение концентраций редкоземельных элементов проводилось методом ICP-MS в «Аналитическом центре геохимии природных систем» при Томском государственном университете (г. Томск) и в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск).

Результаты. По комплексу петро-геохимических критериев выделено пять типов метавулканитов основного-ультраосновного состава. Четыре из пяти выделенных типов представлены породами базальт-мелапикритоидной формации, с которыми ассоциируют интрузии кингашского комплекса. Пятый тип метавулканитов близок к известково-щелочным базальтам и среди прочих образований выделяется макроскопически. Породы базальт-мелпикритоидной фомации образуют с интрузиями кингашского комплекса вулcano-плутонический комплекс, продуктивный на платиноиды, Cu, Ni и являются продуктами дифференциации единого высокомагнезиального расплава. Комплекс исследований позволил определить критерии разделения метабазальтов на два типа, один из которых входит в рудоносную вулcano-плутоническую ассоциацию, а другой пользуется широким распространением только на безрудных частях изученной территории.

Ключевые слова:

Ультрамафиты, базальты, пикробазальты, пикриты, коматииты, ЭПГ, малосульфидные платинометалльные месторождения, зеленокаменный пояс, Канская глыба.

Введение

В последние десятилетия в результате реализации долгосрочной государственной программы по геологическому изучению и воспроизводству минерально-сырьевой базы на юге Сибири выделена новая Восточно-Саянская платино-никеленосная провинция [1]. В пределах Восточно-Саянской провинции выявлены, оценены и разведаны Кингашское и Верхнекингашское месторождения, а также ряд рудопроявлений медно-никелевых и благороднометалльных руд. Промышленно значимые платино-медно-никелевые месторождения и рудопроявления Канской глыбы связаны с мафит-ультрамафитовыми интрузиями кингашского комплекса, рудные тела этих месторождений залегают либо непосредственно в пределах интрузии, либо в её приконтактных частях. Исследователями неоднократно [2–4] отмечалась высокая перспективность рудоносности вулканитов, коматичных интрузиям кингашского комплекса. В ходе поисковых работ 2013–2015 гг. в пределах Кулибинской потенциального рудного узла (северо-запад Канского зеленокаменного пояса (ЗКП)) бы-

ли выявлены геологические перспективы обнаружения промышленных скоплений руд платиноидов и отдельные тела вулканитов основного-ультраосновного состава с содержаниями Pd до 0,5–1 г/т [5]. В данной работе приводится характеристика геологического строения, вещественного состава и геохимических особенностей различных вулканитов узла, перспективы их рудоносности и взаимосвязь с потенциально рудоносными интрузиями кингашского комплекса.

Региональная позиция Канского ЗКП

Канский блок, занимающий пограничное положение между юго-западной окраиной Сибирского кратона и структурами складчатого обрамления, является фрагментом неопротерозойского аккреционного пояса. Для комплексов Канского блока характерна интенсивная тектонизированность и сложное блоково-чешуйчато-надвиговое строение, в породах блока фиксируется многоэтапное проявление дислокаций и метаморфизма [6].

В пределах Канского блока выделено два зеленокаменных пояса: Канский и Идарский [6, 7], в

разрезах которых широко развиты metabазальты и пикробазальты в ассоциации со стратифицированными телами ультрамафитов (меланопикритов, коматиитов) и интрузивными субвулканическими ультрамафитами, эталоном которых является ру-

доносный Кингашский массив. Система тектонических швов северо-западного направления определяет границы Канского и Идарского ЗКП, которые отличаются геологическим строением и составом метасадочно-вулканогенных толщ (рис. 1).

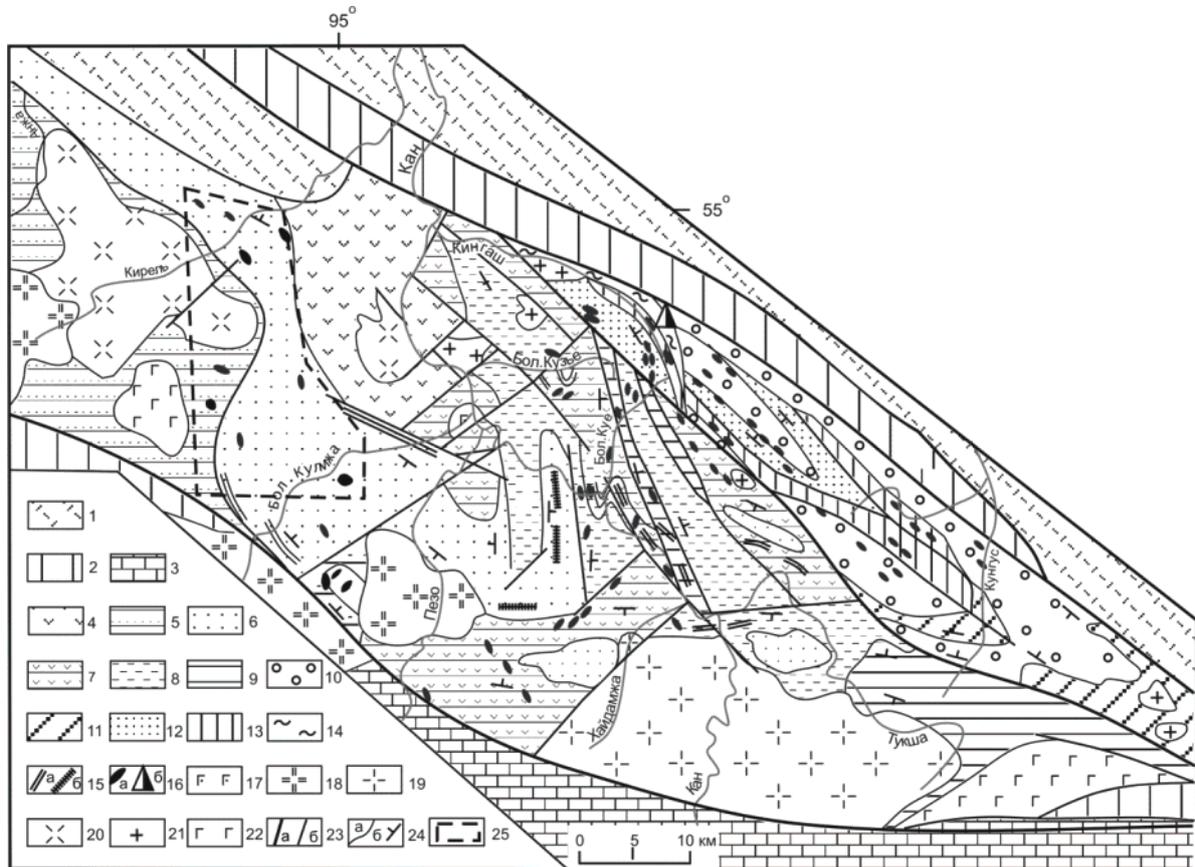


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Канской гранит-зеленокаменной провинции [6]: 1 – осадочно-вулканогенные образования девона (Рыбинская впадина); 2 – вулканогенно-осадочные отложения позднего рифея-кембрия; 3 – метатерригенно-углеводородные комплексы протерозоя; 4, 5 – позднерифейские метаморфические гнейсово-амфиболитовые комплексы: 4 – Шумихинского террейна, 5 – Кирельского ареала; 6–14 – метаморфические толщи зеленокаменных поясов раннего протерозоя: 6 – биотитовых и гранат-биотитовых парагнейсов, 7 – гнейсово-амфиболитовая (дацит-базальтовая), 8 – биотитовых и амфиболитовых ортогнейсов (андезит-дацит-риодацитовая), 9 – амфиболитовая (пикробазальт-базальтовая), 10 – гранатсодержащих амфиболитовых и биотитовых парагнейсов (граувакковая), 11 – полевошпатовых амфиболитов (лейкобазальт-андезитбазальтовая), 12 – гранатсодержащих биотитовых парагнейсов (терригенная) и амфиболитов, 13 – амфиболитовая с горизонтами тремолит-серпентинитовых сланцев (коматиит-базальтовая), 14 – мигматит-гнейсовая; 15 – маркирующие горизонты: а) мраморов, б) кварцитов; 16 – тела ультрамафитов (вне масштаба) (а); треугольником обозначено положение Кингашского рудоносного массива (б); 17–22 – интрузивные комплексы: 17 – палеозойский габброидный, 18 – ордовикский лейкогранит-гранитовый, 19 – вендский тронджемитовый (Верхнеканский массив), 20 – верхнерифейский тоналит-тронджемитовый (Шумихинский и Кирельский массивы), 21 – позднерифейский плагиогранит-гранитовый (Кузинский массив), 22 – раннепротерозойский габбровый; 23 – тектонические границы: а) региональные разломы, б) прочие; 24: а) геологические границы, б) элементы залегания толщ; 25 – Кулибинский рудный узел

Fig 1. Schematic geological map of Kansk granitic-greenstone province [6]: 1 – volcanosedimentary devonian formations (Rybinskaya depression); 2 – volcanosedimentary neoproterozoic deposits; 3 – metaterrigen-carbonaceous proterozoic complexes; 4, 5 – neoproterozoic metamorphic gneiss-amphibolitic complexes: 4 – Shumikhinskiy terrane, 5 – Kirelskiy area; 6–14 – metamorphic series of paleoproterozoic greenstone belts: 6 – biotitic and garnet-biotite paragneisses, 7 – gneiss-amphibolitic (dacit-basaltic), 8 – biotitic and amphibolitic orthogneisses, 9 – amphibolitic (picrobasalt-basaltic), 10 – garnetiferous amphibolitic and biotite paragneisses (greywacke), 11 – feldspathic amphibolites (leicobasalt-andesybasaltic), 12 – garnetiferous biotitic paragneisses (terrigenous) and amphibolitic, 13 – amphibolitic series with beds of tremolite-serpentinic schists, 14 – migmatite-gneissic; 15 – marker horizons: a) marble, b) quartzite; 16 – ultramafit bodies (out of scale) (a); triangle shows the position of the Kingashsk ore-bearing massif (b); 17–22 – intrusive complexes: 17 – paleozoic gabbroic, 18 – ordovician leicogranite-granitic, 19 – neoproterozoic trondhjemitic (Verhnekansk massif), 20 – neoproterozoic tonalite-trondhjemitic (Shumikhinsk and Kirelsk massifs), 21 – neoproterozoic plagiogranite-granitic (Kuzinsk massif), 22 – paleoproterozoic gabbroic; 23 – tectonic borders: a) regional, b) others; 24: a) geological borders, b) attitude elements; 25 – studied Kulibinskaya area

Канский ЗКП расположен в юго-восточной части Канского блока в бассейне рек Кан-Тукша-Куе-Кузье-Кулижа и сложен амфиболито-гнейсовыми толщами с субвулканическими и вулканическими телами ультрамафитов [6]. Исследуемый Кулибинский потенциальный рудный узел (ПРУ) располагается на северо-востоке Канского ЗКП в бассейне рек Кулижа и Кириель и охватывает несколько ареалов тел ультрамафитов среди метаморфизованных вулканогенно-осадочных толщ, в которых преобладают амфиболиты и амфибол-биотитовые гнейсы.

Геологическое строение Кулибинского потенциального рудного узла

Метаморфические образования караганской серии Кулибинского ПРУ разбиты на ряд тектонических блоков северо-западного простирания, в разрезе которых чередуются существенно амфиболитовая верхняя кулижинская толща с гнейсово-парасланцевыми нижней кулижинской и кузьинской, мощности которых достигают 1 км. Для амфиболитовых толщ характерно наличие в разрезе тел ультрамафитов, как субвулканических (дуниты, верлиты, лерцолиты, пироксениты кингашского и идарского комплексов), так и вулканических (пикриты, коматииты (?)). Ультрамафиты образуют линзы, дайки и пластообразные тела, субсогласно залегающие среди вмещающих пород. Гнейсово-парасланцевые толщи нередко вмещают горизонты кварцитов и отдельные маломощные дайки гипабиссальных ультрамафитов и мафитов. Характерна также насыщенность толщ субсогласными и согласными с гнейсовидностью, реже секущими жилами плагиигранитов и их пегматоидными разновидностями.

Характеристика магматических образований Кулибинского ПРУ и особенности их рудоносности приведены в работах [5, 8, 9]. Отличаем от схожих образований Кингашского рудного узла является отсутствие на изученной территории густовкрапленных и сливных медно-никелевых руд. По комплексу петро-геохимических параметров рудоносные объекты отличаются от известных сульфидных платино-медно-никелевых месторождений магматического генезиса [10–13] и схожи с платинометалльными месторождениями Кольского полуострова и Финляндии [14, 15]. Перспективы рудоносности Кулибинского ПРУ связаны с малосульфидным платинометалльным оруденением в субвулканических и вулканических мафит-ультрамафитовых телах. Отмечается литологический и геохимический контроль оруденения, что подробно описано в [5].

Характеристика вулканитов мафит-ультрамафитового ряда

В ходе изучения особенностей петрографического, петрохимического и редкоэлементного состава основных-ультраосновных метавулканитов было выделено пять их типов:

1. Меланопикриты представляют собой равномерно-тонкозернистый агрегат талька, серпентина, тремолита и рудных минералов, с резким преобладанием первых двух. Исходные микроструктуры не сохраняются. По валовому составу данные образования близки к перидотитовым коматиитам (рис. 2, 3) и именуются меланопикритами в виду отсутствия достоверно установленных структур спинифекс. Для меланопикритов характерно наличие бедной пирротин-халькопиритовой вкрапленности и содержание Pd до 1 г/т. Их химический состав близок к составу дунитов рудного узла, описанных в [8].
2. Метапикриты сложены тремолитом, серпентином, тальком с примесью рудных минералов, которые аналогично меланопикритам образуют тонкозернистый агрегат. Количество амфибола колеблется от 20 до 60 %, валовый химический состав метапикритов существенно варьирует, но в целом соответствует составу куммулятивных пикритов кингашского комплекса, описанных в [8]. Вулканические метапикриты отличаются от гипабиссальных аналогов характером распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) (рис. 4): при схожих концентрациях для вулканитов характерны существенно большие отношения La_n/Sm_n (1,2–5 в вулканитах против 1–1,1 в интрузивных) и La_n/Yb_n (1,2–8 в вулканитах против 1–1,1 в интрузивных). По химическому составу и характеру распределения редких элементов метапикриты близки к базальтовым коматиитам БКЗ (по [16]), хотя и отличаются концентрациями лёгких РЗЭ. В целом данные породы близки к базальтовым коматиитам барбетонского типа (рис. 3). Для них характерна бедная рассеянная пирит-халькопирит-пирротиновая вкрапленность и концентрации палладия 0,3–0,7 г/т.
3. Метапикробазальты по минеральному составу схожи с пикритами, однако амфиболы тремолит-актинолитового ряда в них значительно преобладают над серпентином и тальком, слабая 60–80 % от объёма породы, нередко до 100 %. Отмечаются значительные примеси хлорита (10–30 %, редко более). Мономинеральные тремолититы и актинолититы, в отличие от прочих метавулканитов, отчётливо зернистые, в отдельных образцах порфиробластовые. Состав пикробазальтов обнаруживает как сходство с базальтами типа ТН2, так и с базальтовыми коматиитами БКЗ (по [16]). По химическому составу и характеру распределения РЗЭ они близки к высокомагнезиальным толеитовым базальтам ТН2 (рис. 2), однако концентрации ряда редких элементов (Y, Nb и др.) существенно ниже. Отношения $La_n/Sm_n=2,1-2,6$, $La_n/Yb_n=3,7-4,1$, характер графика распределения РЗЭ (рис. 4) аналогичен вышеописанным пикритам, с поправкой на более высокие концентрации. Топология спектров РЗЭ и их кон-

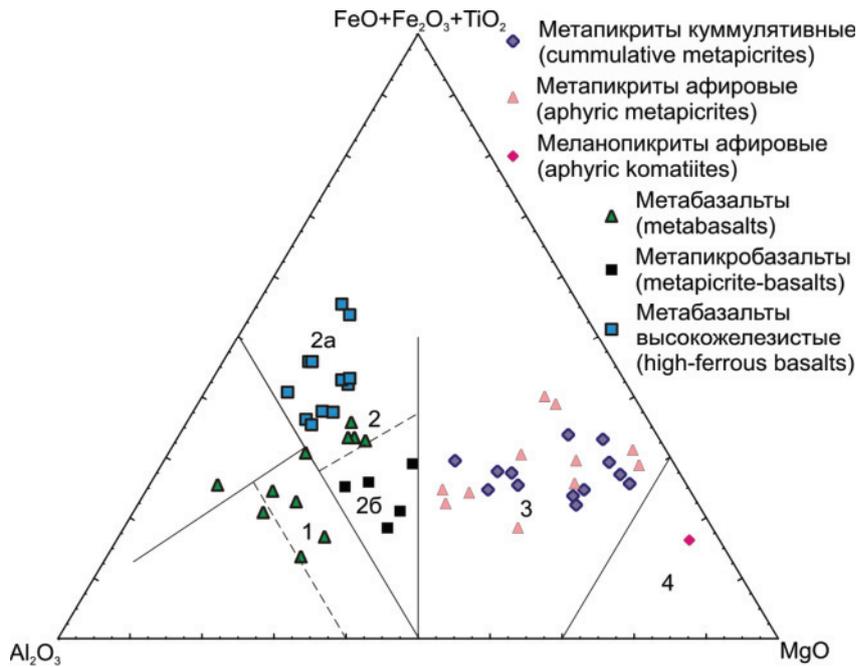


Рис. 2. Вулканыты мафит-ультрамафитового состава на диаграмме $MgO-Al_2O_3-(FeO+Fe_2O_3+TiO_2)$. Поля на классификационной диаграмме (по [17]): 1 – известково-щелочные базальты; 2 – толеитовые базальты: 2a – высокожелезистые, 2б – высокомагнезиальные; 3 – базальтовые коматииты; 4 – перidotитовые коматииты

Fig. 2. Mafic-ultramafic vulcanites on the $MgO-Al_2O_3-(FeO+Fe_2O_3+TiO_2)$ diagram. Classification fields by [17]: 1 – calc-alkalic basalts; 2 – tholeiitic basalt: 2a – hi-ferrous, 2б – hi-magnesium; 3 – basaltic komatiites; 4 – peridotite komatiites

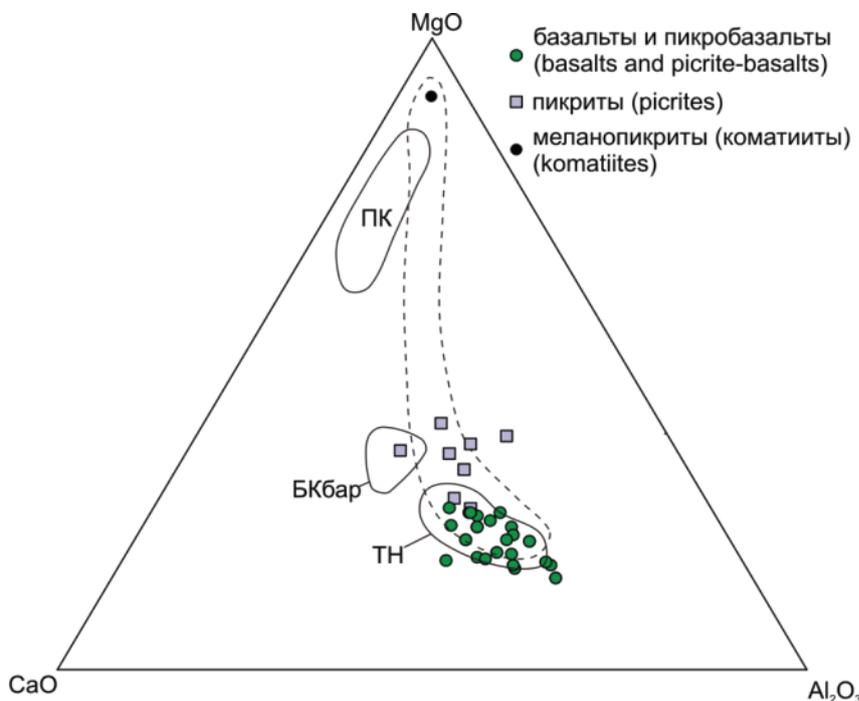


Рис. 3. Составы вулканытов базальт-коматиитовой серии Кулибинского ПРУ. Сплошными линиями – поля составов по [16]: ТН – толеиты, БКбар – базальтовые коматииты барбетонского типа, ПК – перidotитовые коматииты. Пунктиром – коматиит-толеитовый тренд по [16]

Fig. 3. Composition of basalt-komatiitic series vulcanites from Kulibinsky PRU. Solid lines – fields of composition by [16]: ТН – tholeiites, БКбар – barbeton type basaltic komatiites, ПК – peridotitic komatiites. Dashed line – komatiite-tholeiitic trend by [16]

центрации в пикритах и пикробазальтах аналогичны распределению РЗЭ в пикробазальтах Кингашского рудного района по [2]. Данные породы несут петрогеохимические черты сходства как с пикритами, так и с базальтами, являясь переходной разновидностью. Они вмещают пирит-пирротин-халькопиритовую минерализацию до 10–15 об. %, концентрации Pd в них достигают 0,5 г/т.

4. Метабазальты 1-го типа (метабазальты-1) состоят из тремолита, актинолита, роговой обманки, хлорита, эпидота, плагиоклаза и вторичных по нему серицита и соссюрита. В образцах, где амфиболы представлены тремолитом и актинолитом, плагиоклаз отсутствует, отмечаются лишь вторичные по нему минералы; в образцах, где обнаруживается роговая обманка, плагиоклаз представлен серицитизированным андезином № 40, сохраняющим исходные микроструктуры. По валовому химсоставу и особенностям распределения редких и редкоземельных элементов метабазальты 1-го типа

близки к базальтам ТН2 (по [16]), для них характерны отношения $La_n/Sm_n=1,5-5,5$, $La_n/Yb_n=1,8-7,5$ (рис. 4), повышенные в сравнении с пикробазальтами концентрации Y, Zr, и пониженные – Cr, Ni. Отдельные горизонты, обогащенные халькопиритом до 5–7 об. % характеризуются повышенными до 0,5–0,7 г/т концентрациями Pd.

5. Метабазальты 2-го типа (метабазальты-2) сложены роговой обманкой, плагиоклазом (андезин № 30) и кварцем, который слагает 10–20 % объёма породы. По составу они близки к современным известково-щелочным базальтам и андезибазальтам (рис. 2), характеризуются ровными графиками распределения РЗЭ ($La_n/Sm_n=1,1-1,2$, $La_n/Yb_n=1,2-1,3$) и их повышенными концентрациями в сравнении с метабазальтами 1-го типа (рис. 4). В данных породах не обнаружены значимые концентрации платиноидов, и они характеризуются резко пониженными содержаниями хрома и никеля (в 5–7 раз ниже, чем в метабазальтах 1-го типа).

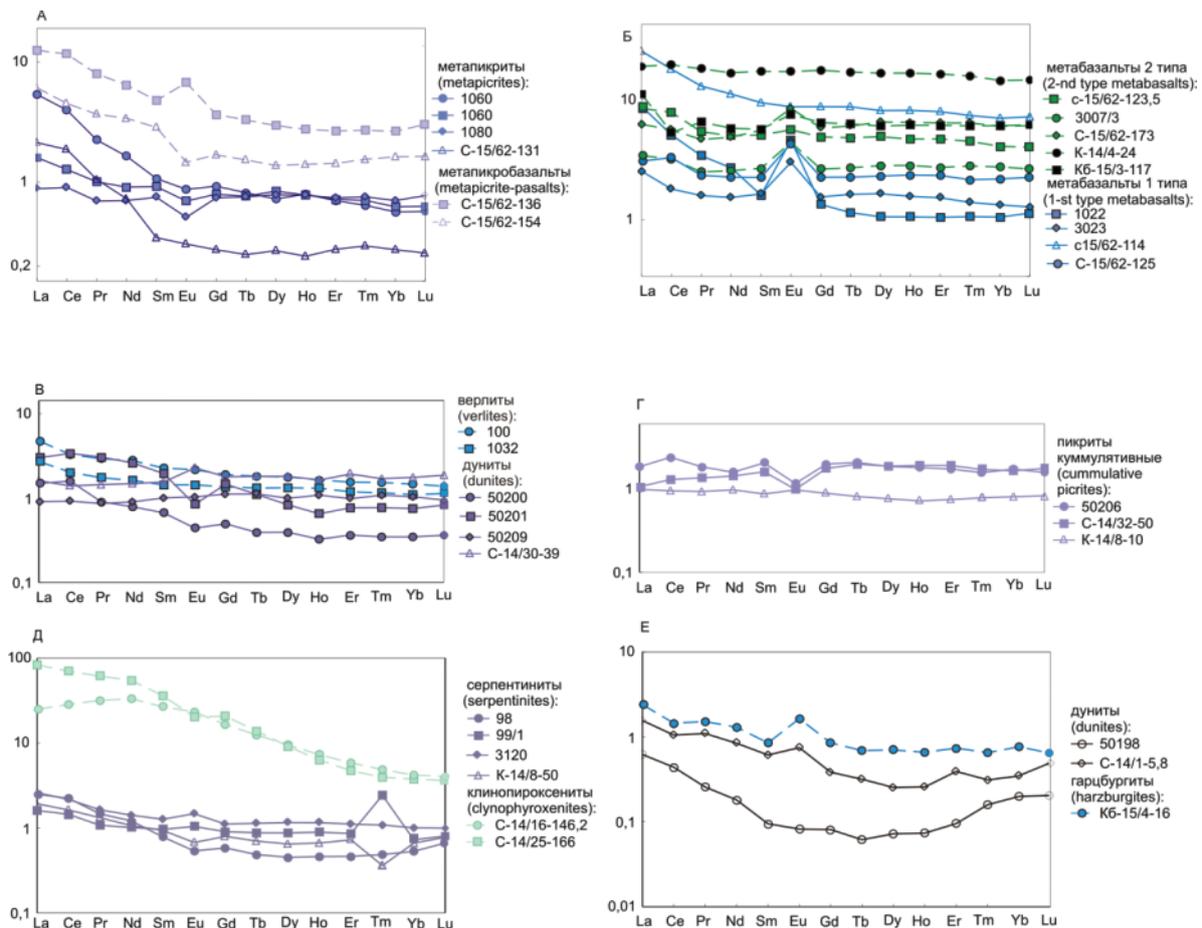


Рис. 4. Графики распределения РЗЭ в породах мафит-ультрамафитового состава Кулибинского ПРУ. А, Б – вулканиты; В–Д – интрузивные ультрамафиты кингашского комплекса, Е – ультрамафиты идарского комплекса. Нормировано по хондриту C1 [18]

Fig. 4. Plot of REE-distribution in mafic-ultramafic rocks from Kulibinsky PRU. А, Б – vulcanites; В–Д – intrusive ultramafits of kingashsky complex, Е – ultramafits of idarky complex. Chondrite C1 normalized [18]

Вулканиды ультрамафитового состава слагают как отдельные тела, так и горизонты мощностью до 100–150 м, в пределах которых отмечается ритмичное переслаивание метапикритов, пикробазальтов и базальтов 1-го типа (рис. 5). Для таких горизонтов характерно постепенное изменение состава вниз по разрезу в сторону увеличения основности, что отчётливо фиксируется в изменении минерального состава от актинолит-соссюритового в верхних частях горизонта до тальк-серпентинового в нижних. Помимо общего тренда увеличения основности, в пределах горизонта может отмечаться несколько ритмов с постепенным увеличением магнезиальности к подошве каждого ритма. Именно в пределах таких ультрамафитовых горизонтов отмечаются наибольшие концентрации ЭПГ в пределах рудного узла.

Метабазальты 2-го типа пользуются широким распространением лишь на удалении от ультрамафитов и не обнаруживают с ними связи в разрезе. С метабазальтами первого типа ассоциируют не только ультрамафитовые вулканиды, с которыми они связаны постепенным переходом, но и коагматичные им интрузии ультрамафитов кингашского комплекса. Таким образом, поля метабазальтов 1-го типа являют собой контур распространения вулканоплутонической ассоциации, продуктивной на Cu-Ni-ЭПГ, которая объединяет вулканические и интрузивные образования мафит-ультрамафитового состава.

Средние и кислые метаэффузивы в рамках данной работы детально не изучались, по петрографическим описаниям на изученной территории представлены гнейсы первых трёх типов, описанных в [6].

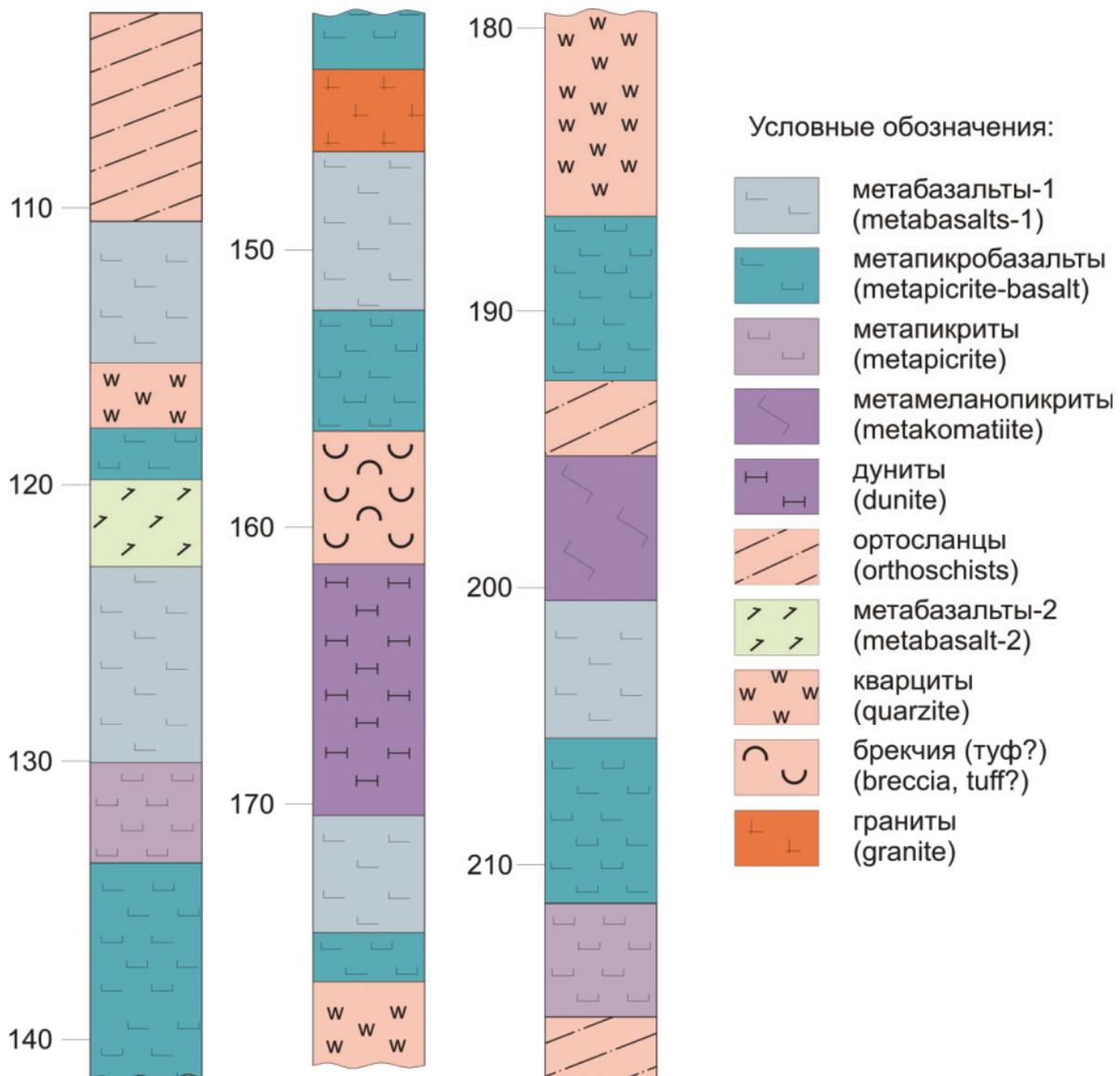


Рис. 5. Фрагмент разреза пикрит-базальтовой толщи по скважине С-15/62 в интервале глубин 105–215 м

Fig. 5. Fragment of picrite-basaltic mass section from drill hole C-15/62 in the depths from 105 to 215 m

Обсуждение

Для всех вышеописанных пород характерны бластоструктуры и отсутствие реликтов первичных минералов. Состав исходных пород реконструирован по петро-геохимическим критериям. Реконструкция проводилась, опираясь на фундаментальные труды [17, 19] и исследования магматизма Канской глыбы [6, 7].

Метабазальты 1-го типа, пикробазальты и пикриты характеризуются сходной топологией спектров РЗЭ с постепенным увеличением их концентраций от базальтов к пикритам. В ряду пикриты–базальты-1 также отмечается постепенное увеличение концентраций ряда редких элементов (Y, Zr, Nb) и снижение концентраций Cr и Ni. На диаграмме (рис. 2) отражается непрерывный тренд от пикритов к базальтам, что в комплексе с характером распределения редких элементов позволяет предположить образование их в ходе дифференциации исходного высокомагнезиального пикритового расплава. Описанный вулканический комплекс в разных работах относится либо к коматит-базальтовой [3, 7], либо к базальт-мелапикритовидной [19, 20] формациям.

Схожая картина была установлена для интрузивных образований кингашского комплекса в пределах Кулибинского ПРУ [5, 8], которые образуют с вулканическими пикритами единое поле на диаграмме (рис. 2). Интрузивные метапикриты характеризуются близкими концентрациями РЗЭ с вулканитами, последние отличаются лишь обогащением лёгкими РЗЭ. Схожесть химического состава, характера распределения редких элементов и тесная пространственная связь вулканитов в ряду метапикриты-метабазальты-1 с интрузиями кингашского комплекса позволяют предположить образование данных пород из единого расплава в ходе его дифференциации. В пределах рудного узла обнаружены вулканические аналоги интрузивных образований кингашского комплекса, в том числе высокомагнезиальные вулканисты ($MgO > 40\%$).

Метабазальты-2 отличаются химическим составом, топологией спектров РЗЭ, концентрациями редких элементов и близки по комплексу петро-геохимических критериев к известково-щелочным базальтам, в отличие от метабазальтов-1, схожих с докембрийскими толеитами зеленокаменных поясов. Потенциально рудоносные ультрамафиты кингашского комплекса не пользуются широким распространением в толщах метабазальтов-2, также последние не несут повышенных концентраций ЭПГ.

Потенциально ЭПГ-Cu-никеленосными в пределах северо-востока Канского ЗКП являются магматические ультрамафиты, с которыми связаны сульфидные медно-никелевые и малосульфидные платинометаллические руды.

Тела ультрамафитов пользуются ограниченным распространением, но находятся в тесной ассоциации с метабазальтами-1, которые зачастую уверенно выделяются в полевых условиях. Таким образом, широкое развитие в разрезе метабазальтов первого типа является критерием выделения потенциально рудоносных участков. В первую очередь это актуально для вулканических толщ, вмещающих горизонты потенциально платиноносных пикритов и пикробазальтов, тела которых в ряде случаев не выделяются по результатам крупномасштабной геофизической съёмки.

Выводы

1. На северо-западе Канского ЗКП известны толщи метабазальтов, вмещающие тела вулканических и гипабиссальных ультрамафитов. Перспективы рудоносности территории связаны с малосульфидными платинометаллическими рудами, обнаруженными в телах метапикритов и меланопикритов в пределах таких толщ.
2. По комплексу признаков на изученной территории выделено два типа метабазальтов. Метабазальты первого типа близки по составу к толеитам зеленокаменных поясов (ТН2 по [16]), для них характерно обогащение лёгкими РЗЭ и отношение $La_n/Yb_n = 1,8-7,5$. Метабазальты второго типа близки по составу к известково-щелочным базальтам, для них характерны отношения $La_n/Yb_n = 1,2-1,3$.
3. Метабазальты первого типа тесно ассоциируют с рудоносными пикритами и пикробазальтами, ритмично переслаиваясь в пределах отдельных горизонтов. На диаграммах в ряду метабазаальт–пикрит наблюдается непрерывный тренд. Метабазальты-1, пикробазальты и пикриты характеризуются схожей топологией спектров РЗЭ с постепенным увеличением их концентраций с уменьшением магнезиальности. Также вулканисты ряда метабазаальт-1–пикрит ассоциируют с интрузивными ультрамафитами рудоносного кингашского комплекса. Структурные и петрогеохимические особенности вышеперечисленных образований позволяют сделать вывод о формировании данных пород из единого пикритового расплава в ходе его дифференциации.
4. Метабазальты 1-го типа зачастую уверенно диагностируются в полевых условиях, что позволяет использовать их для оконтуривания вулкано-плутонической ассоциации, продуктивной на Cu-Ni-ЭПГ, объединяющей вулканические и интрузивные образования мафит-ультрамафитового состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минерально-сырьевые основы новых горнорудных центров Российской Федерации. Золото. Оценка ситуации; северо-восток России; юг России; серебро Западного Верхоянья; никель, медь, платиноиды Восточно-Саянской провинции; титан-циркониевые россыпи; сурьма юга Восточной Сибири / Б.К. Михайлов, С.С. Вартамян и др. // Отечественная геология. – 2007. – № 3. – С. 14–42.
2. Корнев Т.Я., Еханин А.Г. Эталон Кингашского базальт-коматитового комплекса (Восточный Саян). – Новосибирск: СНИИГиМС, 1997. – 88 с.
3. Канский зеленокаменный пояс и его металлогения (Восточный Саян) / Т.Я. Корнев, А.Г. Еханин, А.П. Романов, В.Н. Князев, С.К. Шарифулин. – Красноярск: КНИИГиМС, 2003. – 134 с.
4. Ножкин А.Д., Ципунков М.Ю., Попереков В.А. Сульфидно-никелевое и благороднометалльное оруденение в гранит-зеленокаменной области Восточного Саяна // Отечественная геология. – 1995. – № 6. – С. 11–17.
5. Бабинцев Н.А., Чернышов А.И. Платиноносные пикриты северо-запада Канского зеленокаменного пояса (Восточный Саян) // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Материалы IX всероссийской петрографической конф. с международным участием. – Томск, 2017. – Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2017. – Вып. 9. – С. 38–45.
6. Состав, строение и условия формирования метасадочно-вулканогенных комплексов Канского зеленокаменного пояса (Северо-Западное Присяянье) / А.Д. Ножкин, О.М. Туркина, Е.В. Бибикина, В.А. Пономарчук // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – № 7. – С. 1058–1078.
7. Метасадочные-вулканогенные и интрузивные комплексы Идарского зеленокаменного пояса (Восточный Саян) / А.Д. Ножкин, А.И. Чернышов, О.М. Туркина, Н.И. Кузватов, С.И. Ступаков, Н.В. Дмитриева // Петрология магматических и метаморфических комплексов: материалы всероссийской науч. конф.: в 2 т. – Томск, 2005. – Т. 1. – С. 356–384.
8. Чернышов А.И., Бабинцев Н.А., Ворошилов В.Г. Петрографические и минералогические особенности ультрамафитов Кирельского фрагмента Канского зеленокаменного пояса (СЗ Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 75–88.
9. Бабинцев Н.А., Чернышов А.И. Малосульфидные платинометалльные рудопоявления северо-запада Восточно-Саянской платино-никеленоносной провинции как аналог платинометалльных месторождений комплекса Портимо (Финляндия) // Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал: Материалы V международной конференции. – Улан-Удэ, 2017. – С. 30–32.
10. Andersen J.C.O., Powe, M.R., Momme P. Platinum-Group Elements in the Paleogene North Atlantic Igneous Province // The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements. – 2002. – V. 54. – P. 637–667.
11. Barnes S.-J., Naldrett A.J., Gorton M.P. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas // Chemical geology. – 1985. – V. 53. – P. 303–323.
12. Naldrett A.J. Magmatic Sulfide Deposits. – New York: Oxford University Press, 1989. – 196 p.
13. Barnes S.J. et. al. The mineral system approach applied to magmatic Ni-Cu-PGE sulphide deposits // Ore geology reviews. – 2016 – V. 76 – P. 296–316.
14. Pijna M., Maier W.D., Karinen T. PGE-(Cu-Ni) deposits of the Tornio-Narankavaara belt of intrusions (Portimo, Penikat, and Koillismaa) // Mineral deposits of Finland. – Amsterdam: Elsevier, 2015. – P. 133–164.
15. Гавриленко Б. В. Минерогения благородных металлов и алмазов северо-восточной части Балтийского щита: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Апатиты, 2003. – 399 с.
16. Condie K.C. Archaean greenstone belts. – Amsterdam: Elsevier, 1981. – 434 p.
17. Jensen L.S. A new cation plot for classifying subcalic volcanic rocks. – Ontario: Ontario Division of Mines publ., 1976. – 22 p.
18. Naldrett A.J., McDonough W.F., Sun S.-S. The composition of the Earth // Chemical geology. – 1995. – V. 120. – P. 223–253.
19. Богнибов В.И., Глазунов О.М. Базальт-мелалпикритовая формация Кингашского района Восточного Саяна // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Материалы научной конференции. – Томск: ЦНТИ, 2000. – С. 144–147.
20. Глазунов О.М., Богнибов В.И., Еханин А.Г. Кингашское платино-медно-никелевое месторождение. – Иркутск: Издательство ИГТУ, 2003. – 192 с.

Поступила 04.04.2018 г.

Информация об авторах

Бабинцев Н.А., старший геолог лаборатории геохимических методов ГПКК «Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья».

Чернышов А.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры петрографии Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 552.323.6

TYPIFICATION OF PLATINUM METAL BEARING PICRITES FROM THE NORTH-WEST OF KANSK GREENSTONE BELT (EAST SAYAN)

Nikita A. Babintsev¹,

mas9915@mail.ru

Aleksey I. Chernyshov²,

aich@ggf.tsu.ru

¹ Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Mineral Resources,
55, Mira Avenue, Krasnoyarsk, 660049, Russia.

² National Research Tomsk State University,
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The objects of the study are mafic-ultramafic complexes of Kulibinsk potential ore unit, including intrusive bodies of kingashsk complex and metavolcanic rocks of kuligininskaya and kuzinskaya series; the studied objects are located at the north-west edge of Kansk greenstone belt in East Sayan.

The aim of the research is to study petrographic, petrochemical and structural characteristics of the studied objects, their typing and development criteria for selecting ore-potential areas.

Methods. Petrographic study of the rocks was carried out on the polarization microscope AxioScop 40 firm Carl Zeiss. Investigation of the gross composition of the rocks was carried out at the Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS (Irkutsk) and in the laboratory of Minusinsk Geological Prospecting Expedition. The concentration of rare-earth elements was determined by ICP-MS, which was held in the Analytic Center of Natural Systems Geochemistry of National Research Tomsk State University (Tomsk) and at the Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS (Irkutsk).

Results. According to the set of petro-geochemical criteria the authors have identified five types of mafic-ultramafic metavolcanic rocks, four of them are represented by the rocks of basalt-melapicritic formation, which associates with intrusive massifs of kingashsk complex. Fifth type of metavolcanites is similar to the calc-alkalic basalts and it can be determined macroscopically among other formations. The rocks of basalt-melapicritic formation together with intrusions of kingashsk complex form volcano-plutonic complex, that is productive for platinum group elements, Cu, Ni; these formations are products of differentiation of the same high-mg melt. The studies identify the criteria of distinction of metabasalts on two types, one of them is included in ore-bearing volcano-plutonic association, and the other one is widely distributed only at non-ore parts of the studied territory.

Key words:

Ultramafites, basalts, microbasalts, picrites, komatiites, PGE, low-sulfidic PGE deposits, greenstone belt, Kansk block.

REFERENCES

- Mikhailov B.K., Vartanyan S.S. Mineral base of new Russian mining centers. Silver in the western part of the Upper Yana basin; Nickel, copper, and PGM in the East Sayan province; Antimony in the south of East Siberia. *Otechestvennaya Geologiya*, 2007, no. 3, pp. 14–42. In Rus.
- Kornev T.Ya., Ekhanin A.G. *Etalon Kingashskogo basalt-komatiitovogo kompleksa (Vostochniy Sayan)* [Standard of Kingash basalt-komatiitic complex (East Sayan)]. Novosibirsk, SNIIGiMS Publ., 1997. 89 p.
- Kornev T.Ya., Ekhanin A.G., Romanov A.P., Knyazev V.N., Sharifulin S.K. *Kanskiy zelenokamenny poyas i ego metallogeniya (Vostochnyy Sayan)* [Kansk greenstone belt and its metallogeny (East Sayan)]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Publ., 2003. 134 p.
- Nozhkin A.D., Tspunkov M.Yu., Poperekov V.A. Sulfidno-nikelevoe i blagorodnometalnoe orudnenie v granit-zelenokamennoy oblasti Vostochnogo Sayana [Sulfidic-nickel and noble-metal or-mineralization in granite-greenstone region of East Sayan]. *Otechestvennaya geologiya*, 1995, no. 6, pp. 11–17.
- Babintsev N.A., Chernyshov A.I. Platinonosnye pikirity severo-zapada Kanskogo zelenokamennogo poyasa (Vostochny Sayan) [PGE-bearing picrites from the north-west of Kansk greenstone belt (East Sayan)]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov. Materialy IX vserossiyskoy petrograficheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Proceeding of science meeting]. Tomsk, Tomsk CSTI Publ. house, 2017. Iss. 9, pp. 38–45.
- Nozhkin A.D., Turkina O.M., Bibikova E.V., Ponomarchuk V.A. Structure, composition, and formation conditions of metasedimentary-volcanogenic complexes of Kan greenstone belt (North-West Sayan region). *Geologiya i geofizika*, 2001, no. 7, pp. 1058–1078. In Rus.
- Nozhkin A.D., Chernyshov A.I., Turkina O.M., Kuzovatov N.I., Stupakov S.I., Dmitrieva N.V. Metaosadochnye-vulkanogennye i intruzivnye komplekсы Idarskogo zelenokamennogo poyasa (Vostochnyy Sayan) [Metasedimentary-volcanic and intrusive complexes of Idarsk greenstone belt (East Sayan)]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov. Materialy vserossiyskoy nauchnoy konferentsyi* [Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Proc. of national scientific conference]. Tomsk, 2005. Vol. 1, no. 5, pp. 356–384.
- Chernyshov A.I., Babintsev N.A., Voroshylov V.G. Petrocractical and mineralogical features of ultramafites from kirelsk fragment of kansk greenstone belt (nw of the East Sayan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 75–88. In Rus.
- Babintsev N.A., Chernyshov A.I. Malosulfidnye platinometalnye rudoproyavleniya severo-zapada Vostochno-Cayanskoy platinonikelosnoy provintsii kak analog platinometalnykh mestorozhdeniy kompleksa Portimo (Finlyandiya) [Low-sulfidic PGE deposits from north-west of East-Sayan platinum-nickel province as an analogue of pge deposits of portimo complex (Finland)]. *Ultramafit-mafitovye komplekсы: geologiya, stroenie, rudny potential. Materialy V mezhdunarodnoy konferentsyi* [Mafit-ultrama-

- fic complexes: geology, structure, ore-potential. Proc. of V international conference], Ulan-Ude, 2017. pp. 30–32.
10. Andersen J.C.O., Power M.R., Momme P. Platinum-Group Elements in the Paleogene North Atlantic Igneous Province. *The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements*, 2002, vol. 54, pp. 637–667.
 11. Barnes S.-J., Naldrett A.J., Gorton M.P. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. *Chemical geology*, 1985, vol. 53, pp. 303–323.
 12. Naldrett A.J. *Magmatic Sulfide Deposits*. New York, Oxford University Press, 1989. 196 p.
 13. Barnes S.J. The mineral system approach applied to magmatic Ni–Cu–PGE sulphide deposits. *Ore geology reviews*, 2015, vol. 76, pp. 296–316.
 14. Iljina M., Maier W.D., Karinen T. PGE-(Cu-Ni) deposits of the Tornio-Narankavaara belt of intrusions (Portimo, Penikat, and Koillismaa). *Mineral deposits of Finland*. Amsterdam, Elsevier, 2015. pp. 133–164.
 15. Gavrielenko B.V. *Minerageniya blagorodnykh metallov i almazov severo-vostochnoy chasty Baltiyskogo shchita*. Avtoreferat Kand. nauk [Minerageny of noble metals and diamonds of north-east part of Baltic shield. Cand. Diss. Abstract]. Apatites, 2003. 399 p.
 16. Condie K.C. *Archaean greenstone belts*. Amsterdam, Elsevier, 1981. 434 p.
 17. Jensen L.S. *A new cation plot for classifying subcalic volcanic rocks*. Ontario, Ontario Division of Mines Publ., 1976. 22 p.
 18. Naldrett A.J., McDonough W.F., Sun S.-S. The composition of the Earth. *Chemical geology*, 1995, vol. 120, pp. 223–253.
 19. Bognobov V.I., Glazunov O.M. Bazalt-melapikritoidnaya formatiya Kingashskogo rayona Vostochnogo Sayana [Basalt-melapicrotic formation of Kingash region from East Sayan]. *Petrologiya magmaticallykh i metamorphicheskikh kompleksov. Materialy nauchnoy konferentsyi* [Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Proc. of scientific conference]. Tomsk, TsNTI Publ., 2000. pp. 144–147.
 20. Glazunov O.M., Bognibov V.I., Ekhanin A.G. *Kingashskoe platino-medno-nikelevoe mestorozhdenie* [Kingash Pt-Cu-Ni deposit]. Irkutsk, ISTU publ., 2003. 190 p.

Received: 4 April 2018.

Information about the authors

Nikita A. Babintsev, senior geologist, Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Mineral Resources.

Aleksey I. Chernyshov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk State University.

УДК 551.73.553.98.044

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКА ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ В ОТЛОЖЕНИЯХ ДЕВОНА ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ

Белозёров Владимир Борисович¹,
belozerovvb@hw.tpu.ru

Аура Самид Гарсия Бальса¹,
garciaas@hw.tpu.ru

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью расширения ресурсной базы углеводородов Западной Сибири за счёт вовлечение в разработку залежей нефти в карбонатных коллекторах верхней части палеозойского фундамента.

Цель исследования: выяснить седиментационно-тектонические причины формирования коллекторов в верхней части палеозойского фундамента; выполнить прогноз пространственной ориентировки блоковых движений и зон трещиноватости пород фундамента в зависимости от тектонических преобразований территории в миогеосинклинальный этап развития; оценить возможность выделения нефтеперспективных зон методами сейсморазведки.

Объект: отложения палеозойского фундамента Северо-Останинской площади юго-восточной части Западно-Сибирской нефтяной провинции.

Методы: выделение в разрезах скважин однородных литологических пачек и их стратификация; сопоставление последовательности литологической неоднородности пород фундамента в разрезе с формационным составом миогеосинклинали на различных стадиях её развития; выяснение причин доломитизации органогенных карбонатов, контролирующей залежь нефти на месторождении; палеогеографические реконструкции Северо-Останинской площади на время формирования продуктивного пласта М1 (кровля пород фундамента); прогноз выхода карбонатных пород на эрозионно-тектоническую поверхность фундамента по анализу значений амплитуды отражающего горизонта F_2 (кровля фундамента).

Результаты. На конкретном материале показано соответствие последовательности чередования пород фундамента в разрезах скважин существующей модели формационного состава миогеосинклинали на различных стадиях её развития. Выявлена связь доломитизации органогенных известняков – основного объекта разработки, с экзогенным метасоматозом. Спрогнозирована ориентировка тектонических нарушений и трещиноватости породы в период проявления складчатости смятия, глыбовой и сводовой деформации на этапах миогеосинклинального и рифтового развития территории. Реконструировано распределение фациальных обстановок седиментации на время формирования органогенной постройки. По данным сейсморазведки спрогнозированы зоны выхода на поверхность фундамента органогенных карбонатов, перспективных для поиска залежей нефти.

Ключевые слова:

Доюрские карбонатные породы, Западная-Сибирь, эндогенный и экзогенный метасоматоз, сейсморазведочные работы, формационный анализ, геоструктурная зона.

Введение

В формировании нефтегазоносности палеозойского фундамента юго-восточной части Западно-Сибирской плиты участвуют три самостоятельных поисковых объекта: 1 – кора выветривания (пласт М), 2 – кровельная часть палеозойского фундамента (пласт М1), 3 – глубинный палеозой (пласт М2).

Нефтеносность коры выветривания и кровельной части палеозоя обусловлена генерацией углеводородов как собственно породами фундамента, так и терригенными отложениями нижней части платформенного чехла [1]. Продуктивность глубинных горизонтов связана с генерационным углеводородным потенциалом отложений палеозоя [2–4].

Одним из условий формирования ловушки нефти и газа является наличие коллектора. Формирование проницаемости в коре выветривания определяется типом породы и степенью её преобразования в процессе гипергенеза [5]. Проницаемость кровельной и глубинной частей палеозоя обусловлена первичным составом отложений и их изменением в процессе гипергенеза, эндогенного и экзогенного метасоматоза [6–9].

В качестве нефтепоисковых объектов залежей углеводородов в кровельной части палеозоя выступают эрозионно-тектонические останцы фундамента и отдельные его блоки [10]. Северо-Останинское месторождение контролируется блоковой структурой фундамента. Учитывая, что основная часть эрозионно-тектонических останцов опоискована глубоким бурением, резерв углеводородного сырья в нефтеперспективных блоках фундамента может быть значительным [11, 12].

Однако прогноз таких зон требует определённого подхода в построении геологической модели палеозойской залежи, отличного от ныне существующего. В настоящее время при построении геологической модели анализируется в основном литолого-стратиграфическая неоднородность продуктивной части разреза и не учитывается история тектонического развития территории. Возможно, в условиях уверенного картирования данными сейсморазведки поисковых объектов, связанных с эрозионными останцами, такой подход вполне оправдан, но для поисковых работ в блоках фундамента он недостаточен, и Северо-Останинское месторождение может служить тому примером.

Рассматриваемая залежь нефти, приуроченная к доломитам кровли фундамента, открыта случайно в результате профильного бурения в пределах юго-западного склона Пудинского мезовала, с целью поиска нефтеперспективной ловушки неантиклинального типа в отложениях верхней юры. При бурении третьей по счёту скважины Северо-Останинская № 3 из кровельной части палеозойского фундамента на шестимиллиметровом штуцере был получен приток нефти дебитом 33 м³/сут. В разведочный этап оконтуривания месторождения пробурено 16 скважин, но притоки углеводородов получены лишь в трёх скважинах № 3, 5 и 7. В скважине 5 и 7 дебит нефти составил соответственно 121,5 и 89,8 м³/сут.

Методика исследования

Особенности строения залежи нефти Северо-Останинского месторождения отражены в многочисленных публикациях, где её геологическая модель представлена в виде авторских карт литологического состава кровельной части фундамента [10, 13–15].

В то же время целенаправленные исследования по выявлению нефтеперспективных зон в пределах отдельных блоков требуют совместного анализа седиментационных и тектонических процессов, участвующих в формировании палеозойского разреза. Эти два признака хорошо сочетаются в понятии формация.

Формационный анализ пород фундамента

Формационный подход при изучении геологического строения любой территории предусматривает проведение литолого-стратиграфического анализа разреза совместно с особенностями её тектонического развития в пределах определённой геоструктурной зоны. Тектоническое развитие рассматриваемой территории в палеозое соответствовало миогеосинклинали [16, 17]

В последовательности развития миогеосинклинали (таблица) В.Е. Хаин выделяет четыре стадии, в каждой из которых, в зависимости от климатических условий седиментации, формируется своя последовательность формаций [18]. В рамках представленной последовательности и будет рассмотрено геологическое строение пород фундамента Северо-Останинской площади.

Детальное литолого-стратиграфическое изучение промышленно нефтегазоносных образований палеозоя Северо-Останинской площади базировалось на результатах исследований, ранее проведённых сотрудниками ВНИГНИ [19] и Томского политехнического университета [20].

Основные выводы по генезису формирования продуктивного палеозойского коллектора месторождения на основе результатов работы ВНИГНИ следующие:

1. Формирование нефтегазоносных органогенных известняков в пределах Северо-Останинской площади связано с биогермом (карбонатной

Таблица. Формационный состав платформенных областей [18]

Table. Formational composition of platform areas [18]

Стадии Stages	Геоструктурная зона/Geostructural zone	
	Внешняя (миогеосинклиналь) и передовой прогиб/External (miogeosyncline) and foredeep	
	Гумидный климат/Humid climate	Аридный климат/Arid climate
Заключительная Final	<i>Верхняя молассовая формация/Upper Molasses Formation</i>	
	Лимническая угленосная и континентальная сероцветная грубообломочная формация Limnic coal-bearing and continental gray-colored coarse-clastic formation	Красноцветная грубообломочная континентальная молассовая формация Red-colored coarse-grained continental molasses formation
Поздняя Late	<i>Нижняя молассовая (шлировая) формация/Lower molasses (schlieren) formation</i>	
	Морская нефтеносная и паралическая угленосная молассовая субформация Marine petroliferous and paralic coal-bearing molasse subformation	Лагунно-соленосная молассовая субформация Lagoon-saline molasses subformation
Средняя Middle	<i>Известняковая геосинклинальная формация с субформациями слоистых известняков, массивных известняков и карбонатно-терригенных</i> <i>Geosynclinal limestone formation with subformations of layered limestones, massive limestones and carbonate-terrigenous</i>	
	Субформация битуминозных известняков Subformation of bituminous limestones	Субформация барьерных рифов Subformation of barrier reefs
Ранняя Early	Аспидная (сланцево-граувакковая) формация с флишоидной, сланцевой (аргиллитовой), граувакковой и паралической угленосной субформациями. В зонах сноса с платформ граувакки замещаются кварцевыми песчаниками, а со срединных массивов – аркозовым Slate (shaly-greywacke) formation with flysch, shale (argillite), greywack and paralic coal-bearing subformations. In areas of demolition from the platforms, greywackes are replaced by quartz sandstones, and from the middle massifs – by arkose	

- банкой), слагаемым колониальными (строматопоры, мшанки, водоросли, криноидеи) и бентосными (брахиоподы, гастроподы, формаиниферы) организмами.
2. Продуктивная часть разреза представлена перекристаллизацией органогенных карбонатов в разности доломита серого и белого цвета с коллекторами кавернозно-трещинного типа.
 3. Формирование основной фильтрационно-емкостной составляющей коллектора обусловлено образованием на стадии консолидации породы *тектонической трещиноватости, которая подвергалась затем интенсивному воздействию процессов доломитизации*. В результате первичная трещиноватость была залечена вторичным минералообразованием. За счёт последующего выщелачивания в этих палеотрещинах образовались и частично сохранились пустоты.
 4. По особенностям строения в продуктивной части разреза Северо-Останиской площади выделяются доломиты трёх генераций, первичный – микротонкозернистый, слагающий массивную непроницаемую матрицу, вторичный – яснокристаллический доломит белого цвета, выполняющий трещины различной раскрытости. Доломит третьей генерации – хорошо оформленные ромбоэдрические кристаллы, между которыми сохранились пустоты. Образование вторичных доломитов связано с процессами циркуляции по трещинам и разломам вод, обогащённых ионами магния.
 5. Исходя из порометрических исследований, проницаемость доломитов может быть обусловлена только трещинами. Её величина зависит от раскрытости и характера взаимосвязи трещин.
 6. Основное количество трещин с полостями выщелачивания приурочено к доломиту второй генерации.

Наиболее информативно изучение палеозойского разреза на основе выделения в его составе самостоятельных литологических пачек, по ряду из которых выполнены возрастные определения.

Проведённое литологическое расчленение послужило основой для формирования литолого-стратиграфической схемы сопоставления палеозойских разрезов Северо-Останиской площади.

В соответствии рис. 1, в качестве базового уровня стратиграфической увязки разреза приняты глинистые, органогенные и доломитизированные известняки среднего и верхнего девона. По особенностям распределения литологических пачек в разрезе палеозойского фундамента Северо-Останиской площади можно выделить три литолого-стратиграфические толщ.

Нижнюю толщю формируют карбонатно-эффузивные и карбонатно-глинистые породы нижнего девона, входящие в состав армичевской и солоновской свит. Вскрытая скважинами мощность рассматриваемых отложений изменяется от 48 м (скв. 2) до 332 м (скв. 17).

Согласно представленной таблице, формирование отложений соответствует средней стадии развития миогеосинклинали, характеризующейся накоплением известняковой геосинклинальной формации с субформацией слоистых известняков, представленной переслаиванием известняков (скв. 15, 17, 2), мергелей – глинистых известняков (скв. 9), мергелей и доломитов (скв. 7, 16). Наличие в разрезах скважин 15, 16, 2 включений пластов основных эффузивов и «перематость» пород в скважине 4 свидетельствует о тектонической активности области седиментации в процессе формирования осадков.

Среднюю толщю слагают карбонатно-органогенные, карбонатно-эффузивные, карбонатные и карбонатно-глинистые образования среднего и верхнего девона (герасимовская, лугинецкая свиты). Её вскрытая мощность в пределах Северо-Останиской площади составляет от 44 м (скв. 17) до 185 м (скв. 7). Аналогично нижней пачке формировалась она с средней стадией развития миогеосинклинали и в формационном отношении соответствует субформации барьерных рифов (герасимовская свита – средний девон) и субформации битуминозных известняков [21, 22] лугинецкой свиты верхнего девона (скв. 16).

Верхняя толща представлена карбонатно-кремнистыми, карбонатно-эффузивными, глинисто-кремнистыми и кремнистыми отложениями нижнего и среднего отдела каменноугольной системы (табаганская, средневазюганская свиты). Вскрытая скважинами толщина пачки изменяется от 295 м в скважине 6 до 0 м в скважинах 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 14, 15, 17. По времени образования её можно отнести к поздней стадии развития миогеосинклинали, для которой характерно накопление морской нефтеносной формации. Связь рассматриваемой толщи с доманиковыми горизонтами установлена по результатам литологических исследований глинисто-кремнистых образований на Северо-Варьёганском месторождении [23]. На основе детального изучения вещественного состава этих отложений авторы пришли к выводу, что они могут рассматриваться в качестве аналога доманиковых сланцев Русской платформы. Отличие заключается в интенсивной метасоматической проработке глинисто-кремнистых образований палеозоя Западной Сибири в результате активизации вулканической деятельности на поздней стадии развития миогеосинклинали, что привело к разложению органического вещества и кислотной обработке породы.

В нефтегазоносном отношении промышленная продуктивность разреза Северо-Останиской площади связана со средней толщей, где выделена карбонатная банка (биогерм). В кровельной части органогенной постройки, выходящей на эрозионную поверхность фундамента (скв. 5, 7, 3, 11), выявлены доломиты, являющиеся основным нефтегазоносным объектом на месторождении. Их формирование обусловлено постседиментационной до-

ломитизацией органогенных известняков по тектоническим трещинам, образованным в период до-платформенного и платформенного этапов тектонического развития рассматриваемой территории.

Отложения среднего-верхнего девона, к которым приурочена карбонатная банка, вскрыты на различных глубинах относительно кровли палеозойского фундамента. Проницаемая составляющая карбонатной банки, соотносимая с доломитами, приурочена к кровельной части биогерма, в зонах его выхода на эрозионно-тектоническую поверхность фундамента.

Формирование карбонатной банки было обусловлено наличием серии активных тектонических блоков фундамента, ограниченных дизъюнктивными нарушениями северо-западного простирания, что фиксируется в скважинах.

Эти тектонические нарушения способствовали образованию ступенчатого профиля погружения морского дна палеозойского осадочного бассейна. Одна из таких приподнятых ступеней и инициировала образования и дальнейшее развитие биогерма. Центральной частью биогерма следует считать разрезы скважин 8, 6, 14, 5, 3, 7, 11, где по керну в известняках выделяется представительное сообщество органических остатков.

К переходной зоне биогерма и морского бассейна следует отнести скважины, тяготеющие к тектоническими нарушениями (скв. 15, 9), где отмечается переслаивание органогенных, не органогенных карбонатных пород и эффузивов, а также скважины 10 и 2, в разрезе которых отмечается пачка органогенно-обломочных известняков с прослоями эффузивов (скв. 10) и доломитовая брекчия (скв. 2).

Западнее и восточнее переходных зон биогерма (скв. 15, 12, 13, 1) выделяются области открытого (скв. 12, 13, 1) и изолированного (скв. 15) морского бассейна. Существование открытого бассейна подтверждается наличием тентакулитовой пачки в скважине 2 и преимущественно глинистым составом известняков в скважинах 1, 12, 13. Для лагунной седиментации в условиях закрытого водоёма характерно наличие «чистых» известняков в скважинах 4, 17, 15. Прогнозная фаціальная карта верхнего девона представлена на рис. 1, Б.

Формирование отложений палеозоя юго-востока ЗСП проходило в условиях миогеосинклинали [2]. По результатам геотектонических реконструкций [14] фаза прогибания была характерна для кембрия – нижнего карбона, складчатость смятия и частичная инверсия – для нижнего–среднего карбона, денудация – для среднего–верхнего карбона, глыбовая орогенная складчатость и общая инверсии – для верхнего карбона – нижней перми. Региональная денудация проявилась в верхней перми, а сводовый изгиб и заложение рифтовой системы с последующим проявлением денадуционно-аккумулятивных процессов свойственны триас-юрскому периоду платформенного этапа развития [24].

Каждый из рассматриваемых этапов заканчивался формированием коры выветривания различной стадии «зрелости». Разнообразные типы складчатости, вызванные горизонтальными напряжениями сжатия (складчатость смятия) и вертикальными напряжениями растяжения (складчатость глыбовая и сводового изгиба), влияли на пространственное заложение тектонических нарушений, углы наклона и ориентировку трещиноватости горных пород.

Проведённые замеры углов падения пластов палеозойского комплекса по ориентированному керну в скважинах 3, 15, 5Э и информация по наблюдаемым углам падения литологических разностей в керне свидетельствуют о наличии в пределах Северо-Останиской площади синклинальной складки северо-западного ориентировки [14]. Эта складка, имея углы осадочной слоистости от 45° (скв. 15) до 70–60° (скв. 3, 5Э), осложняет западный склон Нижневартовского инверсионного антиклинария, формирование которого сопровождалось интенсивной разломной и блоковой тектоникой северо-западной направленности.

Вскрытая толщина коры выветривания изменяется от 2 (скв. 7) до 31 (скв. 13) м. В соответствии с литологическим составом, выделяют реликтовую и переотложенную кору выветривания.

Реликтовая кора в скважинах 1, 4, 13 и 14 представлена глинисто-кремнистой пестро окрашенной, трещиноватой, сидеритизированной породой.

Переотложенную кору выветривания слагают мелкообломочные брекчии, состоящие из угловатых обломков (0,5–1,2 см) преимущественно кремнистого состава, сцементированных глинистым, часто сидеритизированным материалом. Такой тип пород выделен в скважинах 2, 3, 5, 6, 7, 9, 8, 10, 11, 12, 13, 15.

В соответствии с литолого-стратиграфическим сопоставлением разрезов скважин (рис. 1, А) в силуре и нижнем девоне в западной части рассматриваемой территории отлагались известняки (скв. 17, 15, 16) с подчинённым участием доломитов и эффузивных пород, которые в восточном направлении замещались преимущественно глинистыми известняками (скв. 7, 9). Пространственное распределение литологических разностей характеризует морской бассейн седиментации с наиболее погруженной восточной частью [25].

В среднем и верхнем девоне на изучаемой территории в условиях тектонической активизации блоков фундамента формировался органогенный биогерм, ограниченный с северо-востока открытым глубоководным бассейном, а с юго-запада – изолированным мелководным морем (рис. 1, Б).

На активизацию тектонической деятельности указывает наличие в основании органогенной постройки пластовых эффузивов основного состава, толщины которых в разрезе скважин составляет от 10 (скв. 15) до 30 (скв. 10) м. Вскрытая мощность биогерма в скважине 7 достигает 185 м.

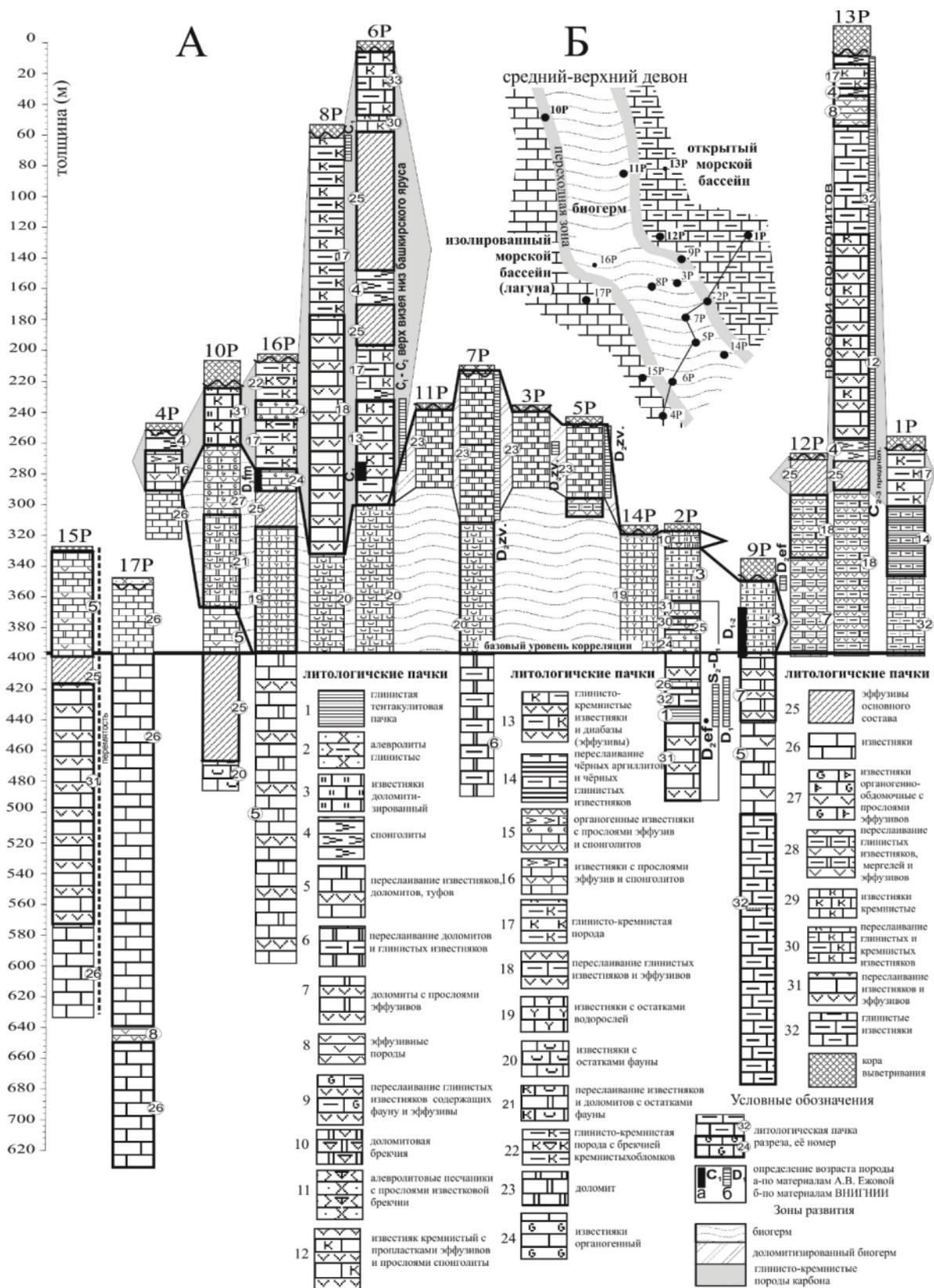


Рис. 1. Литолого-стратиграфическое сопоставление разрезов скважин (А) и палеогеографическая схема среднего-верхнего девона (Б) Северо-Останинской площади

Fig. 1. Lithological-stratigraphic comparison of well sections (A) and the paleogeographic scheme of the middle-upper Devonian (B) of the North-Ostansk area

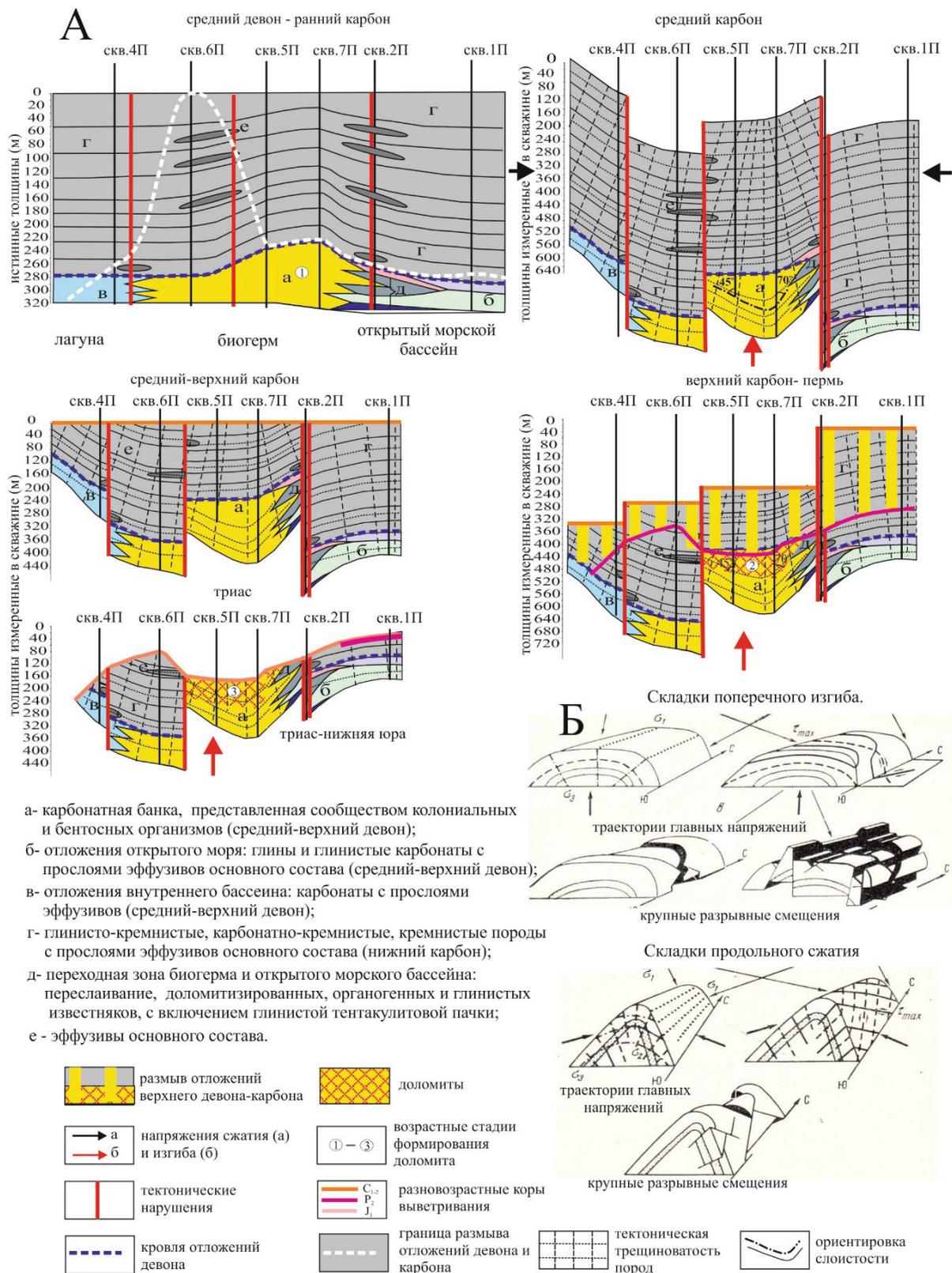


Рис. 2. Последовательность тектонических преобразований для отложений девона-карбона Северо-Останинской площади (А) и матрица блоковых движений в процессе развития миогеосинклинали (Б)

Fig. 2. Sequence of tectonic transformations for deposition of the Devonian-Carboniferous of the North-Ostaninsk area (A) and the matrix of block movements in development of the miogeosyncline (B)

В карбоне преимущественно карбонатно-эффузивное осадконакопление девона сменилось глинисто-кремнистым и карбонатно-кремнистым (рис. 1, А). При этом отмечается усиление тектонической активности по разломам фундамента, на что указывает наличие пластовых эффузивов основного состава в разрезах скважин 6, 12, 13. Толщина отдельных пропластков изменяется от 20 (скв. 12) до 50 (скв. 6) м. В целом вскрытая скважинами толщина отложений карбона, с учётом современных углов падения пластов, достигает 295 м (скв. 6).

Тектоно-седиментационные особенности формирования отложений верхнего палеозоя Северо-Останинской площади с реконструкцией формирования отложений среднего-верхнего девона можно охарактеризовать литолого-тектоническим профилем, представленным на рис. 2, А.

Так, после формирования карбонатной, органогенно-карбонатной и глинисто-кремнистой толщи среднего девона – нижнего карбона на завершающем этапе развития миогеосинклинали (средний–верхний карбон) территория испытала складчатость смятия и частичную инверсию [17]. Рассматриваемый процесс осложнялся проявлением трещиноватости горных пород и тектоническими подвижками блоков фундамента, характерными для деформаций продольного сжатия и поперечного изгиба (рис. 2, Б). В последующем денудация складчатой системы способствовала формированию коры выветривания верхнекамменноугольного возраста.

На заключительной стадии тектонических преобразований в верхнем карбоне – нижней перми на территории, в условиях деформации поперечного изгиба, проявилась глыбовая складчатость и общая инверсия территории. Это активизировало соответствующую направленность блоковых подвижек фундамента и его трещиноватость. В результате последующей региональной денудации в верхний перми рельеф складчатой области был выровнен, что предопределило образование значительной по толщине коры выветривания и накопление за пределами Северо-Останинской площади континентальной сероцветной грубообломочной формации (Нижнетабаганская площадь, скважины 16, 11).

В процессе последующего сводового изгиба в триасе и заложения рифтовой системы в результате активизация движений блоков фундамента произошло обновление палеозойского палеорельефа. В условиях денудационно-аккумулятивного заполнения депрессионных зон отложениями платформенного чехла на выровненных участках пород фундамента были сформированы триас-нижнеюрские коры выветривания.

Сейсмогеологическая интерпретация вещественной неоднородности пород фундамента

Прогноз пространственной неоднородности вещественного состава кровли фундамента Северо-Останинской площади базируется на данных глубокого бурения, значениях амплитуд отражающего

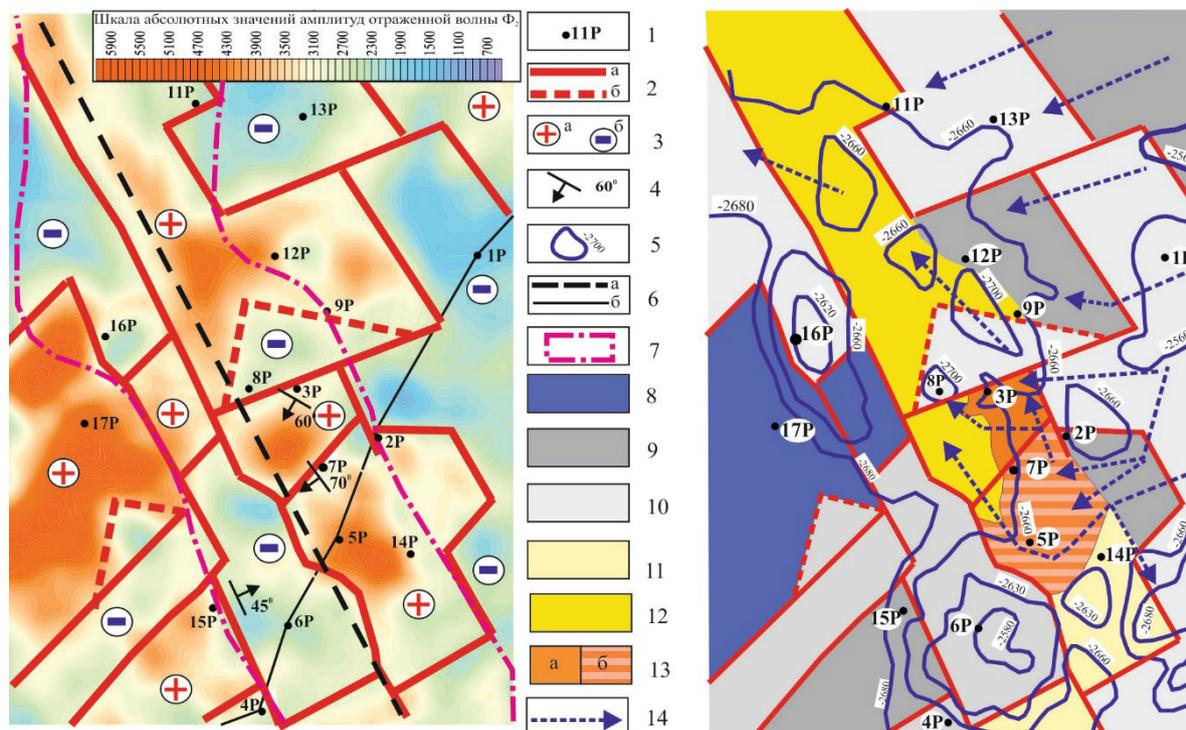


Рис. 3. Сейсмогеологический прогноз блоковой структуры фундамента (А) и вещественный состав отложений палеозоя (Б) Северо-Останинской площади

Fig. 3. Seismogeological forecast of the block structure of the basement (A) and the material composition of the Paleozoic (B) deposits of the North-Ostianinsk area

горизонта Φ_2 (кровля образований палеозоя) и трасировки тектонических нарушений. Проведённые петрофизические исследования kernового материала по эксплуатационной скважине 3 показали, что акустический импеданс (произведение плотности породы на скорость продольной волны) по породам известково-доломитового состава изменяется от 1,7 до 1,8 м/с·кг/м³, а для глинисто-кремнистых отложений он составляет 1,4 м/с·кг/м³. Отличия в акустической жёсткости карбонатных отложений девона и глинисто-кремнистых пород карбона отображаются в различных значениях амплитуды отражения горизонта Φ_2 . С учётом литологической неоднородности кровли палеозойского фундамента по данным бурения (рис. 1, А) и акустической неоднородности отражающего горизонта Φ_2 (рис. 3, А) составлена блоковая модель литологической неоднородности кровли палеозойского фундамента Северо-Останинской площади (рис. 3, Б).

Выделяемые тектонические нарушения, ограничивающие зоны акустической неоднородности, ориентировались в соответствии с распределением прогнозируемых напряжений сжатия и изгиба, которые испытывала рассматриваемая территория в процессе миогеосинклинального и рифтового этапов развития. По поверхности фундамента зонам развития известняков соответствуют пониженные формы рельефа, что обусловлено меньшей устойчивостью этой породы к эрозионным процессам в сравнении с глинисто-кремнистыми отложениями (рис. 3, Б).

Вопросы доломитизации органогенных карбонатов

Дискуссионный вопрос доломитизации карбонатов кровельной части фундамента связан с природой их образования. Принято считать [10, 20], что доломитизация обусловлена гидротермальной метасоматической проработкой отложений по тектоническим нарушениям (эндогенный метасоматоз). Однако аналогичный процесс доломитизации может быть связан и с проявлением гипергенных процессов при экзогенном метасоматозе [6].

При эндогенном метасоматозе зона доломитизации имеет вертикальную зональность развития, а при экзогенном – горизонтальную. Зоны влияния экзогенного метасоматоза приурочены к стратиграфическим перерывам, при этом для доломитизации известняков необходимыми условием является наличие в них трещиноватости и присутствие в стоковых водах ионов магния. Источником магния для доломитизации девонских органогенных построек Северо-Останинской площади являлись пласты основных эффузивов глинисто-кремнистой толщи, в которых по данным ВНИГ-ГНИ содержание MgO составляет от 13 (скв. 6) до 23 % (скв. 2). Разрушение эффузивов на стадии формирования коры выветривания способствовало насыщению стоковых вод ионами магния. Просачивание этих вод в породу по сформированной системе тектонической трещиноватости и предпопре-

делило доломитизацию кровельной части органогенных известняков.

В пользу экзогенной доломитизации органогенных известняков Северо-Останинской площади можно привести следующее:

- 1) доломиты имеют площадное развитие и выявлены в скважинах, где органогенная постройка выведена на эрозионную поверхность фундамента. При этом доломитизации подвержена лишь верхняя её часть, вовлечённая в процесс просачивания стоковых вод. Исключением является скважина 14, расположенная на структурном водоразделе, в которой при испытании в процессе бурения органогенных известняков верхней части фундамента (интервал 2768–2832 м) при депрессии 120 атмосфер за 50 минут притока флюида не получено. Источником магния, обеспечивающим доломитизацию, являлись коры выветривания по основным эффузивам глинисто-кремнистой толщи восточной части территории (скв. 1, 13).
- 2) по данным пораметрических исследований в скважине 11 проницаемость доломитов обусловлена трещинами. Основное количество трещин связано с полостями выщелачивания доломитов второй генерации, сформированных в процессе региональной денудации территории в верхней перми. Микротонкозернистые доломиты первой генерации, слагающие непроницаемую матрицу, отлагались одновременно с формированием биогерма, а образование доломитов третьей генерации связано с денудационными процессами фундамента в платформенный этап развития.
- 3) в кровельной части биогерма скважины 6, перекрытой пачкой основных эффузивов (рис. 1), доломитизации, обусловленной эндогенным метасоматозом, не наблюдается.

Заключение

Статистический анализ свидетельствует, что залежи углеводородов кровельной части пород фундамента в пределах юго-восточной части Западно-Сибирской плиты приурочены к метасоматически изменённым органогенным известнякам.

Перспективы нефтегазоносности в пределах отдельных блоков фундамента следует связывать с участками морфологических ложбин, где органогенные известняки, выведенные в соответствии с исторической последовательностью тектонических преобразований территории, на поверхности фундамента граничат с кремнисто-глинистыми породами, для которых свойственны пласты основных эффузивов, обогащённых окисью магния. В процессе денудации и выветривания основных эффузивов ионы магния вместе со стоковыми водами просачивались по системе тектонических трещин в кровельную часть органогенных построек, доломитизируя её и формируя коллектора порово-трещинного типа.

Сейсмогеологический прогноз литологической неоднородности кровельной части пород палеозоя может быть выполнен по анализу амплитуды отражающего горизонта Φ_2 (кровля фундамента), где

повышенные значения параметра отвечают зонам выхода на поверхность фундамента карбонатных пород и доломитизации органогенных известняков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kontorovich V.A. Petroleum potential of reservoirs at the Paleozoic-Mesozoic boundary in West Siberia: seismogeological criteria (example of the Chuzik-Chizhapka regional oil-gas accumulation) // *Russian Geology and Geophysics*. – 2007. – V. 48. – P. 422–428. URL: https://ac.els-cdn.com/S1068797107000776/1-s2.0-S1068797107000776-main.pdf?_tid=spdf-89cbd216-a2a3-4b32-8cf4-7181cf092ae6&acdnat=1519718474_0a023af04c08fc09fe794fcd4ba10c (дата обращения 09.10.2017).
2. Aryl Isoprenoids in Crude Oils of the Nyuro'l'ka Depression (Southeast of Western Siberia) / D.Yu. Chirkova, N.A. Krasnoyarskaya, O.V. Serebrennikova, Ya.V. Olenov // *Petroleum Chemistry*. – 2017. – V. 57. – № 1. – P. 54–59. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0965544116090036> (дата обращения 09.01.2018).
3. Saltymakova D., Krasnoyarskaya N., Serebrennikova O. Distinct features of crude oils from Nyuro'l'ka Depression (Southeast of Western Siberia) // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2017. – V. 154. – P. 91–99. URL: https://ac.els-cdn.com/S0920410517304278/1-s2.0-S0920410517304278-main.pdf?_tid=spdf-70398633-527d-4ea8-9b1e-a73691bf990&acdnat=1519718618_8c3e8af3df78d4b3d3b73864a8bcd43b (дата обращения 09.01.2018).
4. Zapivalov N.P., Trofimuk A.A. Distribution of oil and gas in Devonian rocks of West Siberia // *Devonian of the World*. – 1988. – V. 1. – P. 553–556.
5. Ковешников А.Е., Недоливко Н.М. Коры выветривания доюрских отложений Западно-Сибирской геосинеклизы // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 77–81. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17335350> (дата обращения 26.09.2017).
6. Коробов А.Д., Коробова Л.А. Гидротермальные процессы в погребенных палеорифтах Западной Сибири и их роль в доломитизации известняков и насыщении пород фундамента нефтью // *Геология нефти и газа*. – 2005. – № 3. – С. 37–46. URL: <http://www.geolib.ru/OilGasGeo/2005/03/Stat/stat06.html> (дата обращения 04.09.2017).
7. Ковешников А.Е., Недоливко Н.М. Вторичнокатагенетические преобразования доюрских пород Западно-Сибирской геосинеклизы // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 82–86. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17335351> (дата обращения 26.09.2017).
8. Ковешников А.Е. Ловушки нефти и газа в доюрских отложениях Западно-Сибирской геосинеклизы (Томская область) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 152–155. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16463785> (дата обращения 02.10.2017).
9. Ковешников А.Е. Месторождения нефти и газа трещинно-метасоматического генезиса в доюрских отложениях Западно-Сибирской геосинеклизы // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 322. – № 1. – С. 105–110. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/mestorozhdeniya-nefti-i-gaza-treshchinno-metasomaticheskogo-genezisa-v-doyurskih-otlozheniyah-zapadno-sibirskoy-geosineklizy> (дата обращения 29.09.2017).
10. Геологические условия нефтегазоносности верхней части палеозойского разреза Западной Сибири (на примере Межовского срединного массива) / А.Э. Конторович, И.А. Иванов, А.Е. Ковешников, В.И. Краснов, Г.Н. Перозин // *Теоретические и региональные проблемы геологии нефти и газа: Сб. науч. трудов / под ред. И.С. Грамберга и др.* – Новосибирск: Наука, 1991. – С. 152–171. URL: <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/science/publications/publ-geologicheskie-usloviya-neftegazonosnosti-verkhney-chasti-011881> (дата обращения 09.10.2017).
11. Gogonenkov G.N., Timurziev A.I. Strike-slip faulting in the West Siberian Platform: Insights from 3D seismic imagery // *Comptes Rendus Geoscience*. – 2012. – V. 344. – P. 214–226. URL: https://ac.els-cdn.com/S1631071311002501/1-s2.0-S1631071311002501-main.pdf?_tid=spdf-fe0c30f3-f855-4558-9d8a-0b7d17b9122e&acdnat=1519719677_443c0e375c3bff0b9ba44204c9e52c2c (дата обращения 15.01.2018).
12. Gogonenkov G.N., Timurziev A.I. Strike-slip faults in the West Siberian basin: implications for petroleum exploration and development // *Russian Geology and Geophysics*. – 2010. – V. 51. – P. 304–316. URL: https://ac.els-cdn.com/S1068797110000179/1-s2.0-S1068797110000179-main.pdf?_tid=spdf-a7d10e6d-acf-4e02-94e2-c1d06107f3d7&acdnat=1519719747_444b31f950b257d48a0553c373593c90 (дата обращения 15.01.2018).
13. Litho-geophysical structure of Paleozoic-Mesozoic contact zones in North-Ostaninsk oil field (Tomsk Oblast) / A. Ezhova, V. Merkulov, V. Chekanstev, R. Abramova // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* – 2015. – № 24. – С. 1–8. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/24/1/012013/pdf> (дата обращения 09.01.2018).
14. Ежова А.В., Меркулов В.П., Чеканцеv В.А. Методы изучения контакта палеозойских и мезозойских отложений на примере литолого-геофизических исследований Северо-Останинского нефтяного месторождения (Томская область) // *Нефтегазовая геология*. – 2015. – № 1 (21). – С. 53–63. URL: <http://docplayer.ru/44857728-1-21-a-v-vezhova-v-p-merkulov-v-a-chekanstev-a-v-vezhova-v-p-merkulov-v-a-chekantsev.html> (дата обращения 09.01.2018).
15. Paleozoic facies megazones in the basement of the West Siberian geosyncline / E.A. Yolkin, A.E. Kontorovich, N.K. Bakharev, S.Yu. Belyaev, A.I. Varlamov, N.G. Izokh, A.V. Kanygin, V.A. Kashtanov, N.P. Kirda, A.G. Klets, V.A. Kontorovich, V.I. Krasnov, V.A. Krinin, S.A. Moiseev, O.T. Obut, S.V. Saraev, N.V. Sennikov, V.M. Tishchenko, Yu.F. Filippov, A.V. Khomenko, V.G. Khromykh // *Russian Geology and Geophysics*. – 2007. – V. 48. – P. 491–504. URL: https://ac.els-cdn.com/S1068797107001083/1-s2.0-S1068797107001083-main.pdf?_tid=spdf-0b4df73d-014e-4e90-9e10-e90fa76035d3&acdnat=1519720055_9eb76dc2dfbcd828b1a2ba126cbc9731 (дата обращения 02.10.2017).
16. Мегакомплексы и глубинная структура земной коры Западно-Сибирской плиты / В.С. Сурков, А.А. Тофимук, О.Г. Жеро, Л.В. Смирнов, А.Э. Конторович, Б.А. Конорейкин, Е.В. Карус, В.М. Ковылин, В.Н. Крамник, А.Л. Рудницкий, А.Н. Страхов, Ф.В. Егоркин, Н.М. Чернышов / под ред. В.С. Суркова. – М.: Недра, 1986. – 148 с.
17. Белоусов В.В. Основы геотектоники. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1989. – 382 с.
18. Геологические формации: терминологический справочник / под ред. В.Ю. Забродина, Ю.А. Косыгина, В.А. Соловьева. – М.: Недра, 1982. – Т. 1. – С. 68–69. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001114379> (дата обращения 02.10.2017).
19. Савинкин П.Т., Славкин В.С., Мартос В.Н. Разработать эффективные системы проектирования разведки и опытно-промышленной эксплуатации нефтяных месторождений на основе

- комплексного моделирования природных резервуаров и новых технологий / Технический отчет по договору N 401 Росгеолфонд. – М.: ВНИГНИ, 1996. – Т. I. – 599 с. URL: <http://www.rfgf.ru/catalog/docview.php?did=83236f063ef4455cc440d9432309f6b3> (дата обращения 10.01.2018).
20. Ежова А.В. Генезис пустотного пространства и емкостно-фильтрационные свойства палеозойских коллекторов месторождений углеводородов Томской области // Геология нефти и газа. – 2007. – № 3. – С. 20–24. URL: https://drive.google.com/file/d/0B_bCwpRhYduYTkJBQkZvTy1hQTg/view (дата обращения 16.01.2018).
21. Запывалов Н.П., Исаев Г.Д. Критерии оценки нефтегазоносности палеозойских отложений Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. – 2010. – № 341. – С. 226–232. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15645998> (дата обращения 27.09.2017).
22. Paleozoic-sourced petroleum systems of the Western Siberian Basin – What is the evidence? / E. Ablya, D. Nadezhkin, E. Bordyug, T. Korneva, E. Kodlaeva, R. Mukhutdinov, M.A. Sugden, P.F. van Bergen // Organic Geochemistry. – 2008. – V. 39. P. 1176–1184. URL: https://ac.els-cdn.com/S0146638008001198/1-s2.0-S0146638008001198-main.pdf?_tid=spdf-751fe0ceeb66-4882-9c20-74eab252d184&acdnat=1519720687_c3619aad1c9eef6abb557d12760a03a0 (дата обращения 17.01.2018).
23. Кудаманов А.И., Карих Т.М., Лебедев М.И. О происхождении кремнистых отложений девона Западной Сибири на примере Северо-Варьёганского месторождения // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 11. – С. 82–85. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30565453> (дата обращения 17.01.2018).
24. Geological Structure of the Basement of Western and Eastern Parts of the West-Siberian Plain / K.S. Ivanov, Y.V. Erokhin, V.S. Ponomarev, O.E. Pogromskaya, S.V. Berzin // International journal of environmental & science education. – 2016. – V. 11. – № 14. – P. 6409–6432. URL: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1115786.pdf> (дата обращения 25.10.2017).
25. Исаев Г.Д. Фациальные модели девона Нюрольской зоны и основные критерии районирования палеозоя Западно-Сибирской плиты // Литосфера. – 2011. – № 6. – С. 27–37. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17948542> (дата обращения 27.09.2017).

Поступила 11.04.2018 г.

Информация об авторах

Белозёров В.Б., доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геологии Центра подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

UDC 551.73.553.98.044

PROSPECTS OF SEARCHING FOR OIL RESERVOIRS IN THE DEVONIAN DEPOSITS OF THE SOUTH-EASTERN PART OF THE WESTERN-SIBERIAN PLATE

Vladimir B. Belozеров¹,
belozerovb@hw.tpu.ru

Aura S. García¹,
garciaas@hw.tpu.ru

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

The relevance of the research is caused by the need to expand the hydrocarbon resource base of Western Siberia by engaging carbonates reservoirs of the Upper Paleozoic Basement in the development of oil deposits.

The aim of the research is to clarify the sedimentation-tectonic reasons for formation of reservoirs in the upper part of the Paleozoic basement; to forecast spatial orientation of block movements and fracture zones of basement rocks depending on the tectonic transformations of the territory in the miogeosyncline stage of development; to assess the possibility of identifying oil-promising zones by seismic exploration methods.

The research object is the deposits of the Paleozoic basement in North-Ostaninsk oil field area of the south-eastern part of Western Siberian petroleum province.

Methods: allocation of homogeneous lithological packs stratigraphy in well columns; comparison of lithological heterogeneity sequence of the basement rocks with the formational composition of miogeosyncline at various stages of its development; clarification of the causes of dolomitization of organogenic carbonates that control oil deposits in the field; paleogeographic reconstruction of the North-Ostaninsk area during the formation of the productive strata M1; forecast of the output of carbonate rocks on erosion-tectonic basement surface by analyzing the values of the amplitude of the reflecting horizon F2 (basement roof).

Results. The concrete material shows the correspondence of the alternation sequence of basement rocks in well sections to the existing model of formational composition of miogeosyncline at various stages of its development. The authors have revealed the relation of dolomitization of organogenic limestones – the main development object, to exogenous metasomatism and forecasted the orientation of tectonic disturbances and fracturing of the rocks at occurrence of contortion folding, block faulting and uplift deformation at the stages of miogeosyncline and rift development of the territory. The distribution of facial sedimentation settings for the time of formation of organogenic structure was reconstructed. According to the seismic survey data, the authors forecasted the zones of output of organogenic carbonates, promising for searching for oil deposits, on the surface of the base.

Key words:

Pre-Jurassic carbonate rocks, Western Siberia, endogenous and exogenous metasomatism, seismic exploration, formational analysis, geostructural zone.

REFERENCES

- Kontorovich V.A. Petroleum potential of reservoirs at the Paleozoic-Mesozoic boundary in West Siberia: seismogeological criteria (example of the Chuzik-Chizhapka regional oil-gas accumulation). *Russian Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, pp. 422–428. Available at: https://ac.els-cdn.com/S1068797107000776/1-s2.0-S1068797107000776-main.pdf?_tid=spdf-89cbd216-a2a3-4b32-8cf4-7181cf092ae6&acdnat=1519718474_0a023af04c08fc09fe794fcd4ba10c (accessed 09 October 2017).
- Chirkovaa D.Yu., Krasnoyarovaa N.A., Serebrennikova O.V., Olenev Ya.V. Aryl Isoprenoids in Crude Oils of the Nyuro'l'ka Depression (Southeast of Western Siberia). *Petroleum Chemistry*, 2017, vol. 57, no. 1, pp. 54–59. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0965544116090036> (accessed 09 January 2018).
- Saltymakova D., Krasnoyarova N., Serebrennikova O. Distinct features of crude oils from Nyuro'l'ka Depression (Southeast of Western Siberia). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, no. 154, pp. 91–99. Available at: https://ac.els-cdn.com/S0920410517304278/1-s2.0-S0920410517304278-main.pdf?_tid=spdf-70398633-527d-4ea8-9b1e-a73691bfc990&acdnat=1519718618_8c3e8af3df78d4b3d3b73864a8bcd43b (accessed 09 January 2018).
- Zapivalov N.P., Trofimuk A.A. Distribution of oil and gas in Devonian rocks of West Siberia. *Devonian of the World*, 1988, vol. I, pp. 553–556.
- Koveshnikov A.E., Nedolivko N.M. Weathering crusts of pre-Jurassic deposits of West Siberian geosyncline. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 77–81. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17335350> (accessed 26 September 2017). In Rus.
- Korobov A.D., Korobova L.A. Hydrothermal processes in buried paleorifts of West Siberia and their role in limestone dolomitization and basement rocks saturation with oil. *Geologiya nefi i gaza*, 2005, no. 3, pp. 37–46. In Rus. Available at: <http://www.geolib.ru/Oil-GasGeo/2005/03/Stat/stat06.html> (accessed 04 September 2018).
- Koveshnikov A.E., Nedolivko N.M. Secondary-catagenetic transformations of pre-Jurassic rocks of the West Siberian geosyncline. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 82–86. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17335351> (accessed 26 September 2017). In Rus.
- Koveshnikov A.E. Oil and gas traps in the pre-Jurassic sediments of the West Siberian geosyncline (Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 152–155. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16463785> (accessed 02 October 2017). In Rus.
- Koveshnikov A.E. Genesis of oil and gas fracture-metasomatic deposits in the pre-Jurassic deposit of Western-Siberian geosyncline. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 1, pp. 105–110. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/mestorozhdeniya-nefti-i-gaza-treschinno-metasomaticheskogo-genezisa-v-doyurskih-otlozheniyah-zapadno-sibirskoy-geosineklizy> (accessed 29 September 2017). In Rus.

10. Kontorovich A.E., Ivanov I.A., Koveshnikov A.E., Krasnov V.I., Perozio G.N. Geologicheskie usloviya neftegazonosnosti verkhney chasti paleozoyskogo razreza Zapadnoy Sibiri (na primere Mezhevskogo sredinnogo massiva) [Geological conditions of oil and gas potential of the upper part of the Paleozoic section of Western Siberia (on the example of the Mezhevsky middle massif)]. *Teoreticheskie i regionalnye problemy geologii nefti i gaza: Sb. nauch. Trudov* [Theoretical and regional problems of oil and gas geology: collection of scientific works]. Ed. by I.S. Gramberg. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991. pp. 152–171. Available at: <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/science/publications/publ-geologicheskie-usloviya-neftegazonosnosti-verkhney-chasti-011881> (accessed 09 October 2017).
11. Gogonenkov G.N., Timurziev A.I. Strike-slip faulting in the West Siberian Platform: Insights from 3D seismic imagery. *Comptes Rendus Geoscience*, 2012, vol. 344, pp. 214–226. Available at: https://ac.els-cdn.com/S1631071311002501/1-s2.0-S1631071311002501-main.pdf?_tid=spdf-fe0c30f3-f855-4558-9d8a-0b7d17b9122e&acdnat=1519719677_443c0e375c3bfff0b9ba44204c9e52c2c (accessed 15 January 2018).
12. Gogonenkov G.N., Timurziev A.I. Strike-slip faults in the West Siberian basin: implications for petroleum exploration and development. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, pp. 304–316. Available at: https://ac.els-cdn.com/S1068797110000179/1-s2.0-S1068797110000179-main.pdf?_tid=spdf-a7d10e6d-aacf-4e02-94e2-c1d06107f3d7&acdnat=1519719747_444b31f950b257d48a0553c373593c90 (accessed 15 January 2018).
13. Ezhova A., Merkulov V., Chekanstev V., Abramova R. Litho-geophysical structure of Paleozoic-Mesozoic contact zones in North-Ostaninsk oil field (Tomsk Oblast). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2015, no. 24, pp. 1–8. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/24/1/012013/pdf> (accessed 09 January 2018).
14. Ezhova A.V., Merkulov V.P., Chekantsev V.A. Methods to study of Paleozoic-Mesozoic contact zone by the example of lithologic-geophysical investigations of the Northern-Ostaninskoye oil field (Tomsk region). *Neftegazovaya geologiya*, 2015, no. 1 (21), pp. 53–63. Available at: <http://docplayer.ru/44857728-1-21-a-vezhova-v-p-merkulov-v-a-chekanstev-a-v-vezhova-v-p-merkulov-v-a-chekantsev.html> (accessed 09 January 2018). In Rus.
15. Yolkin E.A., Kontorovich A.E., Bakharev N.K., Belyaev S.Yu., Varlamov A.I., Izokh N.G., Kanygin A.V., Kashtanov V.A., Kir-da N.P., Klets A.G., Kontorovich V.A., Krasnov V.I., Krinin V.A., Moiseev S.A., Obut O.T., Saraev S.V., Sennikov N.V., Tishchenko V.M., Filippov Yu.F., Khomenko A.V., Khromykh V.G. Paleozoic facies megazones in the basement of the West Siberian geosyncline. *Russian Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, pp. 491–504. Available at: https://ac.els-cdn.com/S1068797107001083/1-s2.0-S1068797107001083-main.pdf?_tid=bbc2cc3c-15fb-11e8-ba67-00000aab0f27&acdnat=1519103336_02f0414120d2cd0ecae3b8764cf9bb7e (accessed 02 October 2017).
16. Surkov V.S., Tofimuk A.A., Zhero O.G., Smirnov L.V., Kontorovich A.E., Konoreykin B.A., Karus E.V., Kovylin V.M., Kramnik V.N., Rudnitskiy A.L., Strakhov A.N., Egorkin F.V., Chernyshov N.M. *Megakompleksy i glubinnaya struktura zemnoy kory Zapadno-Sibirskoy plity* [Megacomplexes and deep structure of the earth's crust of the West Siberian plate]. Ed. by V.S. Surkov. Moscow, Nedra Publ., 1986. 148 p.
17. Belousov V.V. *Osnovy geotektoniki* [Fundamentals of geotectonics]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 382 p.
18. Zabrodin V.Yu., Kosygin Yu.A., Solovyev V.A. *Geologicheskie formatsii: terminologicheskii spravochnik* [Geological formations: reference terminological book]. Moscow, Nedra Publ., 1982, vol. 1, pp. 68–69. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001114379> (accessed 02 October 2017).
19. Savinkin P.T., Slavkin V.S., Martos V.N. Razrabotat effektivnyye sistemy proektirovaniya razvedki i opytno-promyshlennoy ekspluatatsii neftyanykh mestorozhdeniy na osnove kompleksnogo modelirovaniya prirodnykh rezervuarov i novykh tekhnologiy [Develop an efficient system for design exploration and experimental-industrial exploitation of oil fields on the basis of integrated modeling of natural reservoirs and new technologies]. *Tekhnicheskii otchet po dogovoru N 401 Rosgeolfond* [Technical report on the contract No. 401 Rosgeolfond]. Moscow, VNIGNI Publ., 1996. Vol. I, 599 p. Available at: <http://www.rfgf.ru/catalog/docview.php?did=83236f063ef4455cc440d9432309f6b3> (accessed 10 January 2018).
20. Ezhova A.V. Pore space genesis and rock-fluid properties of Paleozoic reservoirs of Tomsk area fields. *Geologiya nefti i gaza*, 2007, no. 3, pp. 20–24. In Rus. Available at: https://drive.google.com/file/d/0B_bCwpRhYduYTkJBQkZvTy1hQTg/view (accessed 16 January 2018).
21. Zapivalov N.P., Isaev G.D. Criteria of estimation of oil-and-gas bearing Paleozoic deposits of Western Siberia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 341, pp. 226–232. In Rus. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15645998> (accessed 27 September 2017).
22. Ablya E., Nadezhkin D., Bordyug E., Korneva T., Kodlaeva E., Mukhutdinov R., Sugden M.A., van Bergen P.F. Paleozoic-sourced petroleum systems of the Western Siberian Basin – What is the evidence? *Organic Geochemistry*, 2008, vol. 39, pp. 1176–1184. Available at: https://ac.els-cdn.com/S0146638008001198/1-s2.0-S0146638008001198-main.pdf?_tid=552bcd4c-15fc-11e8-989f-00000aacb362&acdnat=1519103594_5291aa3079f553c9ec7cca2887d7b327 (accessed 17 January 2018).
23. Kudamanov A.I., Karikh T.M., Lebedev M.I. Revisiting the clues to the origin of Devonian siliceous deposits of West Siberia: case study of the Severo-Varyoganskoye field. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2017, no. 11, pp. 82–85. In Rus. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30565453> (accessed 17 January 2018).
24. Ivanov K.S., Erokhin Y.V., Ponomarev V.S., Pogromskaya O.E., Berzin S.V. Geological Structure of the Basement of Western and Eastern Parts of the West-Siberian Plain. *International journal of environmental & science education*, 2016, vol. 11, no. 14, pp. 6409–6432. Available at: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1115786.pdf> (accessed 25 October 2017).
25. Isaev G.D. Devonian facial models of Nyurolskaya zone and general criteria of Paleozoic districting of the Western-Siberian plate. *Lithosphere*, 2011, no. 6, pp. 27–37. In Rus. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17948542> (accessed 27 September 2017).

Received: 11 April 2018.

Information about the authors

Vladimir B. Belozеров, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aura S. García, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.276

ПРИЧИНЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ОБВОДНЕННОСТИ В СКВАЖИНАХ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА В НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАСТАХ

Валеев Азамат Салаватович¹,
Azamat.Valeev@lukoil.com

Дулкарнаев Марат Рафаилович¹,
marat.dulkarnaev@lukoil.com

Котенев Юрий Алексеевич^{2,3},
geokot@inbox.ru

Султанов Шамиль Ханифович^{2,3},
ssultanov@mail.ru

Бриллиант Леонид Самуилович⁴,
ting@togi.ru

¹ Территориально-производственное предприятие «Повхнефтегаз» ООО «ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь», Россия, 628486, г. Когалым, ул. Широкая, 40.

² Уфимский государственный нефтяной технический университет Республики Башкортостан, Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

³ Институт стратегических исследований Республики Башкортостан, Россия, 450075, г. Уфа, пр. Октября, 129/3.

⁴ ЗАО «Тюменский институт нефти и газа», Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Герцена, 64.

Актуальность. Вопросы снижения доли воды в объеме добываемой продукции в настоящее время являются весьма актуальными. Добыча углеводородов, которые залегают в сложном и неоднородном коллекторе, с применением высокопроизводительных технологий может привести к осложнениям, в том числе, связанным с ростом обводненности и невозможностью последующего ее снижения. Причина указанной проблемы – часто недостаточное понимание геологического строения залежи.

Цель работы: на примере Ватьеганского нефтяного месторождения обосновать причины высоких значений обводненности добываемой продукции скважин после проведения гидравлического разрыва пласта, в том числе, учитывая влияние анизотропии пласта в условиях различного расположения добывающих и нагнетательных скважин.

Методы: геолого-промысловый анализ разработки эксплуатационного объекта; анализ, сопоставление и интерпретация результатов геофизических исследований скважин; методы литолого-фациального анализа; методы статистической обработки геолого-промысловых и геолого-геофизических данных.

Результаты. Определен тип геологического разреза продуктивного пласта, в котором отмечаются высокие значения доли воды в «запускных» дебитах скважин после проведения гидравлического разрыва пласта. Выделено три основных типа разреза пласта ЮВ, Ватьеганского нефтяного месторождения. В случае с гидродинамически связанным коллектором приоритетной является интенсификация притока из кровельной части (реперфорация), при вовлечении в работу водонасыщенных интервалов при «двухслойном» типе строения коллектора, определяющими являются водоизоляционные работы. Наименьшая вероятность обводнения продукции скважин после проведения гидравлического разрыва пласта отмечена в скважинах с выдержанным песчаным телом, расположенным в кровельной части разреза, с заглинизированной подошвенной частью.

Ключевые слова:

Гидравлический разрыв пласта, неоднородный пласт, низкие фильтрационно-емкостные свойства, анизотропия пласта, обводненность скважины, пласт ЮВ.

С целью вовлечения в разработку недраенируемых или слабодраенируемых запасов нефти на месторождениях Западной Сибири выполняют работы по бурению боковых стволов, бурению скважин с целью уплотнения сетки скважин и освоения малотолщинных нефтенасыщенных пластов. Как правило, незадействованные в разработке зоны продуктивного пласта характеризуются: плохими коллекторскими свойствами, осложненным геологическим строением, более высокой неоднородностью и другими неблагоприятными геолого-геофи-

зическими условиями и параметрами. Для решения вопроса эффективной выработки запасов данных участков на «новых» скважинах перед вводом в эксплуатацию проводят гидравлический разрыв пласта (ГРП). Среди основных проблем при проведении ГРП на вновь пробуренных скважинах является высокая обводненность добываемой продукции, а на скважинах с горизонтальным окончанием, кроме этого, – определение эффективности «работы» интервалов воздействия многостадийным ГРП [1–4].

Часто технологический эффект от проведения геолого-технического мероприятия сводится к оценке полученной дополнительной нефти, увеличения дебита жидкости, снижения обводненности продукции скважин. Кроме того, используются универсальные подходы расчета эффективности работ на основе единой базовой системы уравнений. Уравнения учитывают механику многофазных сред, и алгоритм их решения реализован в гидродинамически симуляторах [5–10]. Качественная оценка полученных результатов от выполнения работ на скважине сводится к общему пониманию возможного влияния отдельных геолого-промысловых факторов, характеризующих пласт в целом, а иногда и объект разработки.

С целью более детального понимания причин добычи жидкости с высокой долей воды в объеме продукции скважины на отдельном участке Ватъеганского месторождения по пласту ЮВ₁ выполнен анализ эффективности ГРП на новых скважинах.

Продуктивные отложения верхней юры Нижневартовского свода характеризуются сложным строением, в том числе изменчивостью литологических особенностей и фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС), обусловленных различной обстановкой седиментации и степенью наложенного изменения (эпигенез) пород. Анизотропные свойства пород-коллекторов сформированы не только в результате седиментогенеза, но и посредством воздействия со стороны флюидных систем, оказывающих различное влияние на технологию эксплуатации [11–14].

Особенности осадконакопления васюганской свиты Ватъеганского нефтяного месторождения свидетельствуют о формировании продуктивных отложений в прибрежных, преимущественно мелководно-морских условиях в процессе проградации побережья при участии небольшой дельты типа «птичья лапа». Распределение пористости и проницаемости с резко различающимися значениями объясняется эпигенетическим влиянием химически активных термальных флюидов, поступающих из глубинных разломов по зонам разуплотнения в осадочных породах чехла. Особенности распределения песчаного материала и параметров ФЕС по латерали и по разрезу позволяют связывать основные перспективы нахождения продуктивных терригенных пород-коллекторов, имеющих улучшенные значения ФЕС, с зонами распространения барьерных баров и островов, сложенных наиболее грубозернистыми и сортированными осадками и повышенной трещиноватостью [13–15].

В вертикальном разрезе отложений пласта ЮВ₁ Ватъеганского месторождения выделено три типа коллектора: «гидродинамически связанный коллектор», характеризующийся чередованием глинистых прослоев; «частично гидродинамически связанный коллектор», представлен выдержанным песчаным телом, расположенным в кровельной части разреза, и заглинизированной подош-

венной частью с незначительной долей водонасыщенной толщи; «двухслойный коллектор», отличающийся от предыдущего тем, что подошвенная часть представлена сопоставимым по толщине опесчаненным интервалом, насыщенным водой. Наибольшее распространение по площади имеют «частично гидродинамически связанный коллектор» и «двухслойный» тип коллектора. Гидродинамически связанный коллектор представлен небольшими «врезами» в центральной и восточной части исследуемого участка (рис. 1) [15, 16].

В существующих геологических условиях не следует ожидать высоких показателей, характеризующих выработку запасов нефти. Геолого-промысловый анализ текущего состояния разработки пласта ЮВ₁ свидетельствует, что 33 % добывающего фонда скважин работает в диапазоне обводнения от 0–50 %. С обводненностью более 50 % эксплуатируется 67 % скважин. Фонд малодобитных скважин с дебитом нефти менее 5 т/сут составляет 45 %. Приемистость нагнетательных скважин изменяется от 3 до 282 м³/сут, средняя приемистость по скважинам составила 68,4 м³/сут. В среднем на каждую скважину приходится 210,3 тыс. м³ закачанной воды.

Высокая дифференциация значений обводненности и объемов закачиваемого рабочего агента для поддержания пластового давления ставит задачу о понимании причин роста доли воды в объеме добываемой продукции скважин с вероятным выделением вод из водонасыщенных пластов и «закачиваемых», особенно после проведения гидравлического разрыва пласта.

Геолого-промысловый анализ показателей работы скважин, вводимых в эксплуатацию без проведения гидравлического разрыва пласта («входная» обводненность) в первый год работы, показывает различные интервалы изменения значений обводненности продукции по различным типам разрезов. Так, интервалы изменения значений обводненности скважин, разрабатывающих зону пласта с гидродинамически связанным коллектором, составляет 0–38 %, с частично гидродинамически связанным коллектором – 0–22 %, с двухслойным коллектором – 0–34 %. Значительная доля скважин исследуемого участка пласта ЮВ₁ Ватъеганского месторождения характеризуется высокой обводненностью продукции добываемых скважин (рис. 2).

Анализ и сопоставление значений обводненности добываемой продукции до и после проведения гидроразрыва пласта в различных типах развития коллекторов, а также результаты расчетов, выполненных на ядерных материалах, показали высокую сходимость (таблица). Наибольший прирост после выполнения ГРП (27 %) наблюдается в скважинах, характеризующих гидродинамически связанный коллектор, по причине отсутствия глинистой перемычки и вовлечения в работу водонасыщенных подошвенных интервалов. В случае с частично гидродинамически связанным коллектором

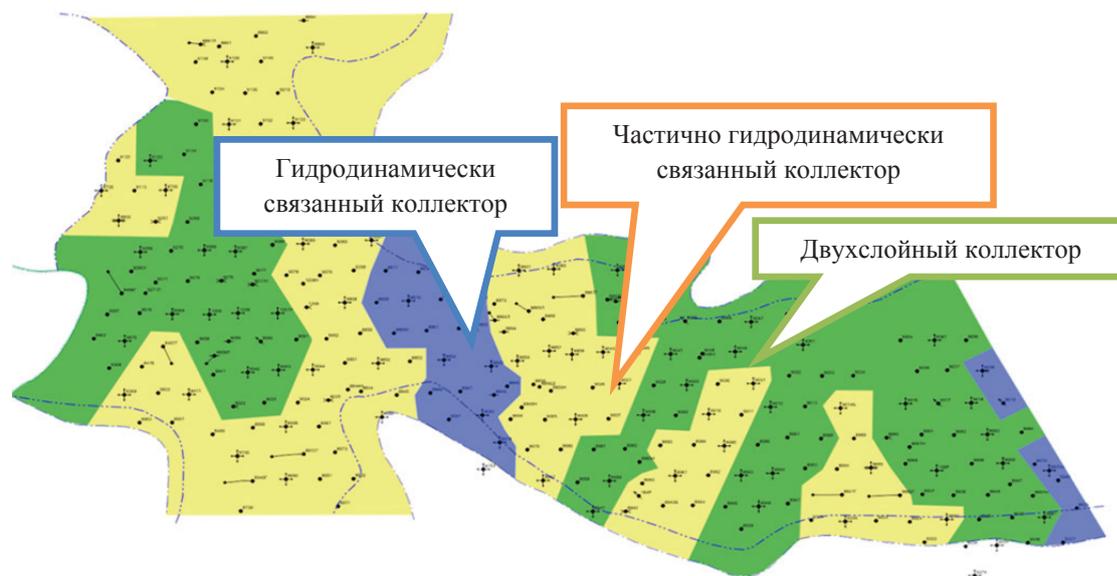


Рис. 1. Распространение типов коллектора по площади

Fig. 1. Area distribution of the types of collectors

значения сопоставимы (15 и 18 %, соответственно) при двухслойном строении, в ряде случаев трещина ГРП вскрывает глинистый раздел, что является причиной увеличения обводненности до 22 %.

Выделение различных типов коллекторов в вертикальном разрезе позволяет сформировать представление о возможном обводнении скважин подошвенными водами. Для изучения причин продвижения воды по напластованию рассмотрен вопрос латеральной анизотропии и размещения на-

гнетательных и добывающих скважин [8, 9, 17–19]. Рассмотрены элементы «добывающая–нагнетательная» скважины, отличающиеся направлением вытеснения нефти: с запада на восток, с северо-запада на юго-восток, с северо-востока на юго-запад. Также в условиях Ватъеганского месторождения учтено два случая: добывающие скважины находятся в ряду с нагнетательными (вытеснение в направлении запад-восток), ряды состоят исключительно из добывающих скважин (рис. 4).

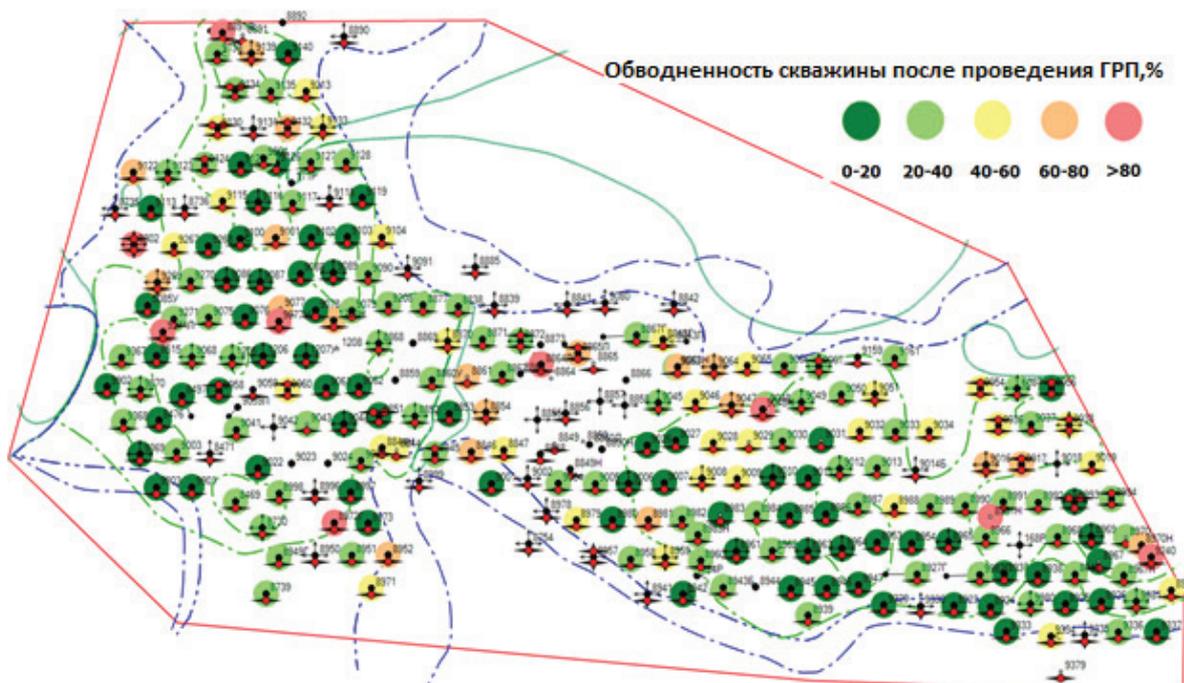


Рис. 2. Обводненность скважин после проведения ГРП

Fig. 2. Watercut of wells after hydraulic fracturing

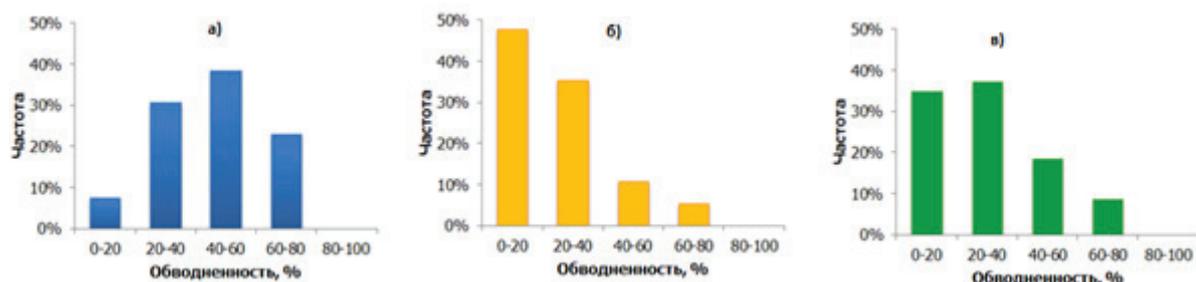


Рис. 3. Распределение обводненности после ГРП по типам разреза коллектора: а) гидродинамический связанный коллектор; б) частично гидродинамически связанный коллектор; в) двухслойный коллектор

Fig. 3. Distribution of watercut after fracturing by the types of the reservoir section: а) hydrodynamic bound reservoir; б) partly hydrodynamic bound reservoir; в) two-layer reservoir

Таблица. Обводненность после ГРП по типам разреза коллектора

Table. Watercut after fracturing by types of reservoir section

Тип разреза Section type	Обводненность, % / Watercut, %		
	После ГРП After fracturing	Разведочные скважины Exploration wells	По керну By core
«гидродинамически связанный коллектор» «hydrodynamic bound reservoir»	47	23	20
«частично гидродинамически связанный коллектор» «partially hydrodynamic bound reservoir»	18	15	14
«двухслойный коллектор» «two-layer reservoir»	22	13	11

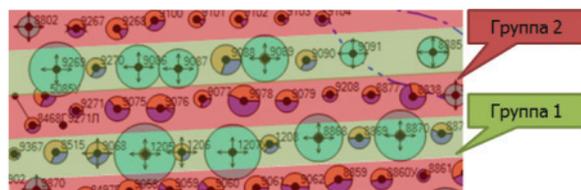


Рис. 4. Распределение рядов добывающих и нагнетательных скважин

Fig. 4. Distribution of production and injection wells

Анизотропия внутри каждого типа отдельно оценивалась по парам скважин. Гидродинамически связанный коллектор на участке исследования распространен в меньшей степени и выделить пару скважин – добывающая–нагнетательная, в пределах данного типа, при условии отсутствия влияния других нагнетательных скважин, являлось затруднительным. Изучение и сопоставление геологических материалов и результатов интерпретации сейсморазведочных работ позволило отметить сходимость распространения гидродинамически связанного коллектора и области распространения малоамплитудных и неамплитудных нарушений. Выявленные нарушения по морфологии можно определить в три системы тектонической трещиноватости: северо-западное и северо-восточное на-

правление; субширотную; субмеридиональную. Все три системы представляют собой транспортные артерии фильтрации пластового флюида и развиты в областях песчаных коллекторов – зоны трещинного коллектора [20]. Кроме того, анализ данных геофизических исследований скважин свидетельствует о гидродинамической связи по вертикали и явном улучшении коллекторских свойств с глубиной. Таким образом, основной причиной значительного роста обводнения продукции скважин для рассматриваемого типа разреза является улучшение фильтрационных свойств в «центральной» части эксплуатационного объекта в результате проведения гидравлического разрыва пласта. Следствием этого является как прорывы к добывающим скважинам закачиваемых вод, так и «подтягивание» подошвенных и краевых вод.

Для скважин, представляющих в разрезе «частично» гидродинамически связанный коллектор, водонефтяной фактор не зависит от направления вытеснения. Незначительный рост доли воды в объеме добываемой продукции после ГРП обусловлен заглинизированной подошвенной частью с незначительной долей водонасыщенной толщи и выдержанным песчаным коллектором (рис. 5). Выполнение мероприятий по улучшению ФЕС позволило вовлечь в разработку слабодренлируемые пропластки. Зоны продуктивного пласта, представленные «частично» гидродинамически связанным коллектором, являются наиболее благоприятными для проведения гидравлического разрыва пласта.

Исследования анизотропии пород-коллекторов показало, что ориентировка миграции углеводородов внутри пласта ЮВ, выдерживается стабильной: около 30–90°, либо 30–45° на северо-восток [20]. Такие участки выделяются на юго-восточной окраине месторождения. В скважинах, вскрывших коллектора с двухслойным строением, водонефтяной фактор при вытеснении в направлении с севера на юг выше, чем у «частично» гидродинамически связанного коллектора, со значениями, соответственно, 1,2 и 0,85 (рис. 5). Причиной роста обводнения скважин для данного типа коллектора после проведения гидравлического разрыва

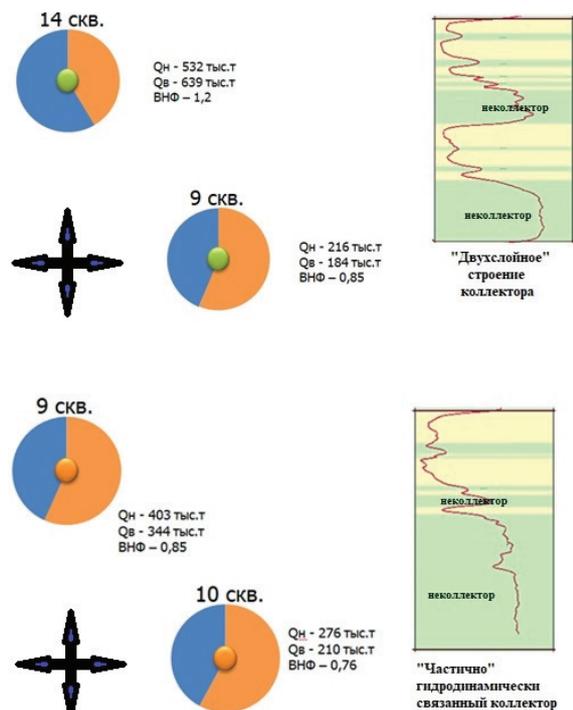


Рис. 5. Латеральная анизотропия в зависимости от типа коллектора

Fig. 5. Lateral anisotropy depending on the type of reservoir

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дияшев И.Р., Смаровозов А.А., Гиллард М.Р. Супер-ГРП на Ярайнерском месторождении // Нефтяное хозяйство. – 2001. – № 7. – С. 44–48.
2. Кибирева А.С., Цыганова Э.Ф., Виноградова И.А. Опыт применения гидравлического разрыва пласта в горизонтальных скважинах на месторождениях ООО «Лукойл – Западная Сибирь» // Состояние, тенденции и проблемы развития нефтегазового потенциала Западной Сибири: Тр. Междунар. академ. конф. – Тюмень, 2009. – С. 465–472.
3. Boak J. Shale-Hosted Hydrocarbons and Hydraulic Fracturing // Future Energy. Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet. – 2014. – V. 2. – P. 117–120.
4. Study of the borehole hydraulic fracturing and the principle of gas seepage in the coal seam / W. Peng, M. Xian-biao, L. Jin-bin, D. Chun-zhi // Procedia Earth and Planetary Science. – September 2009. – V. 1. – Iss. 1. – P. 1565–1568.
5. Михайлов В.Н., Дулкарнаев М.Р., Волков Ю.А. Проблемы и опыт проектирования разработки длительно эксплуатируемых залежей нефти на примере Ватъганского месторождения Западной Сибири // Высоковязкие нефти и природные битумы: проблемы и повышение эффективности разведки и разработки месторождений: труды международной научно-практической конференции. – Казань, 5–7 сентября 2012. – Казань: Изд-во «Фэн» Академии наук РТ, 2012. – С. 255–257.
6. Demidov A.V., Pyatibratov P.V. Justifying method of enhancing oil recovery of multizone reservoirs including hydrodynamic connected reservoirs // Indian Journal of Science and Technology. – November 2016. – V. 9 (42). – P. 2–8.
7. Torres L., Yadav O.P., Khan E. A review on risk assessment techniques for hydraulic fracturing water and produced water management implemented in onshore unconventional oil and gas

пласта является создание трещин и благоприятных условий для фильтрации к эксплуатационным скважинам воды от фронта нагнетания, тем более что в условиях данного типа разреза скважины имеют «рядное» расположение. Регулирование системы заводнения для коллектора с двухслойным строением после проведения ГРП можно проводить с одновременной закачкой в нагнетательную скважину потокорегулирующих составов.

Заключение

При формировании программы геолого-технических мероприятий для снижения риска преждевременного обводнения скважин рекомендуется более детально понимать геологию продуктивной части пласта и определять тип разреза скважины.

В случае с гидродинамически связанным коллектором приоритетной является интенсификация притока из кровельной части (реперфорация). При вовлечении в разработку пластов с «двухслойным» типом строения коллектора определяющими являются водоизоляционные работы. Наименьшая вероятность обводнения продукции скважин после проведения ГРП отмечена в скважинах с выдержанным песчаным телом, расположенным в кровельной части разреза. С целью более полного учета фронта движения закачиваемых вод следует учитывать систему размещения скважин.

- production // Science of The Total Environment. – 1 January 2016. – V. 539. – P. 480–482.
8. Evaluation of heterogeneity impact on hydraulic fracturing performance / H. Parvizia, S. Rezaei-Gomaria, F. Nabhanian, A. Turner // Journal of Petroleum Science and Engineering. – June 2017. – V. 154. – P. 345–347.
9. Osipov A.A. Fluid mechanics of hydraulic fracturing: a review // Journal of Petroleum Science and Engineering. – May 2017. – V. 156. – P. 513–535.
10. Decheng Z.D., Ranjuth P.G., Perera M.S.A. The brittleness indices used in rock mechanics and their application in shale hydraulic fracturing: a review // Journal of Petroleum Science and Engineering. – July 2016. – V. 143. – P. 160–161.
11. Котенев Ю.А., Дулкарнаев М.Р. Методические принципы комплексного обоснования выработки неоднородных и сильнорасчлененных пластов залежей нефти Когалымского региона // Нефтегазовое дело. – 2014. – Т. 12. – № 1. – С. 13–24.
12. Дулкарнаев М.Р. Комплексное геотехнологическое обоснование выработки высоконеоднородных и сильнорасчлененных пластов залежей нефти (Когалымский регион) // Нефтепромысловое дело. – 2014. – № 3. – С. 18–23.
13. Особенности постседиментационного преобразования верхнеюрских отложений Западной Сибири / З.Я. Сердюк, Г.Д. Исаев, И.К. Микуленко, А.И. Кудаманов, А.Р. Сайфутдинов // НТЖ «Георесурсы». – 2008. – Т. 5 (28). – С. 29–31.
14. Салимов Ф.С. Опыт применения ГРП на пластах с маломощными барьерами нефтяных месторождений Когалымского региона // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала ХМАО–Югры: Двенадцатая научно-практическая конференция. – Ханты-Мансийск, 2009. – Т. 2. – С. 29–37.
15. Simulation and experimental studies of mineral scale formation effects on performance of Sirri-C oil field under water injection / A. Taheri, M. Zahedzadeh, R. Masoudi, A. Ataei, E. Roayaei,

- Н. Fakhri // Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering. – 2011. – V. 30 (3) – P. 9–24.
16. Методические основы планирования и организации интенсивных систем заводнения (на примере пластов Ватъеганского и Тевлинско-Русскинского месторождений) / А.С. Валеев, М.Р. Дулкарнаев, Ю.А. Котенев, Ш.Х. Султанов Л.С. Бриллиант, Д.Ю. Чудинова // НТЖ «Экспозиция. Нефть. Газ». – 2016. – № 3 (49). – С. 38–41.
17. Ушаков А.С., Самойлов А.С. Анализ результатов ГРП в горизонтальных скважинах месторождений ОАО «Сургутнефтегаз» // Проблемы геологии и освоения недр: Тр. Междунар. симпозиума им. академика Усова. – Томск, 2010. – С. 337–341.
18. Муратшин Д.Р., Гуторов Д.А. Анализ влияния фильтрационно-емкостных свойств коллекторов Тарасовского месторождения на эффективность ГРП // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 3. – С. 103–112.
19. Юсифов Т.Ю. Гидро разрыв нефтяных пластов с низким давлением // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 3. – С. 179–184.
20. Отчет о научно-исследовательской работе лито-фациальные исследования и стадийный анализ керна верхнеюрских отложений Ватъеганского месторождения для оптимизации поисков залежей и эксплуатации / А.И. Кудаманов, Ю.К. Романов, О.В. Хорина и др. – Когалым: ООО «Когалымнипнефть», 2009. – Т. 7. – 404 с.

Поступила 29.11.2018 г.

Информация об авторах

Валеев А.С., генеральный директор территориально-производственного предприятия «Повхнефтегаз» ООО «ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь».

Дулкарнаев М.Р., кандидат технических наук, заместитель генерального директора по разработке месторождений, главный геолог территориально-производственного предприятия «Повхнефтегаз» ООО «ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь».

Котенев Ю.А., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета; заведующий лабораторией «Технология воздействия на пласт» Института стратегических исследований Республики Башкортостан.

Султанов Ш.Х., доктор технических наук, профессор кафедры геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета; заведующий лабораторией «Математическое моделирование процессов нефтегазоизвлечения» Института стратегических исследований Республики Башкортостан.

Бриллиант Л.С., кандидат технических наук, генеральный директор ЗАО «Тюменский институт нефти и газа».

UDC 622.276

REASONS OF WATER VOLUME INCREASING IN WELLS AFTER HYDRAULIC GAP IN HOMOGENEOUS PLATES

Azamat S. Valeev¹,
Azamat.Valeev@lukoil.com

Marat R. Dulkarnaev¹,
marat.dulkarnaev@lukoil.com

Yury A. Kotenev^{2,3},
geokot@inbox.ru

Shamil K. Sulnatov^{2,3},
ssultanov@mail.ru

Leonid S. Brilliant⁴,
ting@togi.ru

¹ Territorial production enterprise «Povheftegaz» JSC «LUKOIL – Western Siberia»,
40, Shirokaya street, Kogalym, 628486, Russia.

² Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia

³ Institute of Strategic Studies of the Bashkortostan Republic,
129/3, Oktyabrya avenue, Ufa, 450075, Russia.

⁴ Tyumen Institute of Oil and Gas,
64, Gertsen street, Tyumen, 625000, Russia.

Relevance. The issues of decreasing the share of water in the volume of output are currently extremely urgent and can be solved everywhere. Production of hydrocarbons that lie in a complex and heterogeneous reservoir, using high-performance technologies can lead to complications, including those associated with increased water cut and impossibility of its subsequent reduction. The reason for this problem is often insufficient understanding of geological structure of the deposit.

The main aim of the study is to justify the causes of high water cut values of well production after hydraulic fracturing on the example of the Vatyeganskoye oil field, taking into account the effect of formation anisotropy on watercut values in conditions of different locations of producing and injection wells.

Methods: geological and field analysis of the development of operational facility; analysis, comparison and interpretation of the results of geophysical methods of well research; methods of lithologic-facies analysis; methods of statistical processing of geological-field and geological-geophysical data.

Results. The authors have determined the characteristic of a reservoir section at which high values of water proportion in the «starting» well flow rates are observed after hydraulic fracturing of formation. Three main types of the JV₁ section of the Vatiegan oil field are identified. In the case of hydrodynamically connected reservoir, the priority is the intensification of the inflow from the roofing part (reperforation), with involvement of water-saturated intervals in the «two-layer» type of the reservoir structure, the repair and insulation works are determinant. The least probability of watering the production of wells after fracturing was noted in the wells with an aged sandy body located in the roof of the section and clogged with a plantar part with a small fraction of the water-saturated strata.

Key words:

Hydraulic fracturing, heterogeneous bed, low filtration and capacitor properties, anisotropy of a reservoir, water cut, reservoir JV₁.

REFERENCES

1. Diyashev I.R., Smarozov A.A., Gillard M.R. Super-GRP at the Yaraynerskoye field. *Oil industry*, 2001, no. 7, pp. 44–48. In Rus.
2. Kibireva A.S., Tsyganova E.F., Vinogradova I.A. Opyt primeneniya gidravlicheskogo razryva plasta v gorizontalnykh skvazhinakh na mestorozhdeniyakh OOO «Lukoil– Zapadnaya Sibir» [Experience in applying hydraulic fracturing in horizontal huts at the fields of JSC «LUKOIL–Western Siberia»]. *Sostoyaniye, tendentsii i problemy razvitiya neftegazovogo potentsiala Zapadnoy Sibiri. Trudy Mezhdunarodnoy akademicheskoy konferentsii* [State, Trends and Problems of Development of Oil and Gas Potential of Western Siberia. Proc. International Academic conference]. Tyumen. 2009, pp. 465–472.
3. Boak J. Shale-Hosted Hydrocarbons and Hydraulic Fracturing. *Future Energy (Second Edition). Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet*, 2014, vol. 2, pp. 117–120.
4. Peng W., Xian-biao M., Jin-bin L., Chun-zhi D., Study of the borehole hydraulic fracturing and the principle of gas seepage in the coal seam. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009, no. 1, pp. 1565–1568.
5. Mikhaylov V.N., Dulkarnaev M.R., Volkov Yu.A. Problemy i opyt proektirovaniya razrabotki dlitelno ekspluatiruemykh zalezhey nefti na primere Vateganskogo mestorozhdeniya Zapadnoy Sibiri [Problems and experience in designing the development of long-term oil fields using the example of the Vatyeganskoye field in Western Siberia]. *Vysokovyazkie nefti i prirodnye bitumy: pro-*

- blemy i povyshenie effektivnosti razvedki i razrabotki mestorozhdenii. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [High viscosity oil and natural bitumen: problems and increasing the efficiency of exploration and development of deposits. Proc. of the International scientific and practical conference]. Kazan, 2012. pp. 255–257.
6. Demidov A.V., Pyatibratov P.V. Justifying method of enhancing oil recovery of multizone reservoirs including hydrodynamic connected reservoirs. *Indian Journal of Science and Technology*, November 2016, vol. 9 (42), pp. 2–8.
 7. Torres L., Yadav O.P., Khan E. A review on risk assessment techniques for hydraulic fracturing water and produced water management implemented in onshore unconventional oil and gas production. *Science of the Total Environment*, 2016, no. 539, pp. 480–482.
 8. Parvizia H., Rezaei-Gomaria S., Nabhanian F., Turner A. Evaluation of heterogeneity impact on hydraulic fracturing performance. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, no. 154, pp. 345–347.
 9. Osipov A.A. Fluid mechanics of hydraulic fracturing: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Available online, 2017, vol. 156, pp. 513–535.
 10. Decheng Z.D., Ranjuth P.G., Perera M.S.A. The brittleness indices used in rock mechanics and their application in shale hydraulic fracturing: a review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, no. 143, pp. 160–161.
 11. Kotenev Yu.A. Methodical principles of complex justification of development of non-uniform and fractured layers of oil deposits of in Kogalym region. *Oil and gas business*, 2014, no. 1, pp. 13–24. In Rus.
 12. Dulkarnayev M.R. Complex geotechnological justification of development of high-non-uniform and strongly dissociated oil deposits (Kogalym region). *Oil-field business*, 2014, no. 3, pp. 18–23. In Rus.
 13. Serdyuk Z.Ya., Isaev G.D., Mikulenko I.K., Kudamanov A.I., Saifutdinov A.R. Peculiarities of post-sedimentation transformation of Upper Jurassic deposits of Western Siberia. *Georesursy*, 2008, vol. 5 (28), pp. 29–31. In Rus.
 14. Salimov F.S. Opyt primeneniya GRP na plastakh s malomoshchnymi barerami neftyanykh mestorozhdeniy Kogalymnskoj regiona [Experience in applying hydraulic fracturing in reservoirs with low-power barriers in oil deposits in Kogalym region]. *Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala KhMAO–Yugry: Dvenadtsataya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Ways of implementing oil and gas and ore potential of Khanty-Mansiysk Autonomous District–Yugra. The twelfth scientific and practical conference]. Khanty-Mansiysk, 2009. No. 2, pp. 29–37.
 15. Taheri A., Zahedzadeh M., Masoudi R., Ataei A., Roayaei E., Fakhri H. Simulation and experimental studies of mineral scale formation effects on performance of Sirri-C oil field under water injection. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 2011, no. 30 (3), pp. 9–24.
 16. Valeev A.S., Dulkarnaev M.R., Kotenev Yu.A., Sultanov S.Kh., Brilliant L.S., Chudinova D.Yu. Methodical bases of planning and organizing intensive flooding systems (on the example of the Vategansky and Tevlinsko-Russkinskoye deposits). *Exposition. Oil. Gas*, 2016, no. 3 (49), pp. 38–41. In Rus.
 17. Ushakov A.S., Samoylov A.S. Analiz rezultatov GRP v gorizontalnykh skvazhinakh mestorozhdeniy OAO «Surgutneftegaz» [Analysis of the results of fracturing in horizontal wells of the fields of OJSC «Surgutneftegaz»]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma im. akademika Usova* [Problems of geology and subsoil development. Proc. International symposium named after academician Usov]. Tomsk, 2010. pp. 337–341.
 18. Muratshin D.R., Gutorov D.A. Analysis of the effect of the reservoir properties of Tarasovskoe field on fracturing efficiency. *Electronic scientific journal «Oil and gas business»*, 2011, no. 3, pp. 103–112. In Rus.
 19. Yusifov T.Yu. Hydrofracturing of low-pressure oil reservoirs. *Electronic scientific journal «Oil and gas business»*, 2012, no. 3, pp. 179–184. In Rus.
 20. Kudamanov A.I., Romanov Yu.K., Khorina A.V. *Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote lito-fatsialnykh issledovaniy i stadial'nogo analiza kerna verkhneyurskikh otlozheniy Vatyeganskogo mestorozhdeniya dlya optimizatsii poiskov zalezhey i ekspluatatsii* [Report on the research work of lithological and facies studies and stadal analysis of core samples of the upper Jurassic sediments of Vatyegansk field to optimize exploration and exploitation]. Kogalym, Kogalymnipeft Publ., 2009. 404 p.

Received: 29 November 2018.

Information about the authors

Azamat S. Valeev, general director of the territorial production enterprise «Povheftegaz» JSC «LUKOIL – Western Siberia».

Marat R. Dulkarnaev, Cand. Sc., deputy general manager in exploration, chief geologist of the territorial production enterprise «Povheftegaz» JSC «LUKOIL – Western Siberia».

Yury A. Kotenev, Dr. Sc., professor, head of the department, Ufa State Petroleum Technological University; head of the laboratory, Institute of Strategic Studies of the Bashkortostan Republic.

Shamil K. Sulnatov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University; head of the laboratory, Institute of Strategic Studies of the Bashkortostan Republic.

Leonid S. Brilliant, Cand. Sc., general manager, Tyumen Institute of Oil and Gas.

УДК 553.3/4.06:552.11–047.58

ПРОБЛЕМЫ РУДНОЙ ГЕОЛОГИИ И ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР. ЧАСТЬ 2. МАГМАТИЗМ И МЕЗОТЕРМАЛЬНОЕ РУДООБРАЗОВАНИЕ

Кучеренко Игорь Васильевич,

kivr@tpu.ru

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

Актуальность. Сосуществование взаимно исключающих одна другую гранитогенной, базальтогенной, метаморфогенной, полигенной гипотез образования одних и тех же гидротермальных месторождений золота, цветных металлов (Sn, W, Mo, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Sb) стимулирует исследования, направленные на коррекцию, углубление теории гидротермального рудообразования и совершенствование, разработку прогнозно-поисковых критериев месторождений, необходимых для преимущественно глубинных поисков новых объектов и пополнения минерально-сырьевой базы металлов.

Цель: посредством изучения последовательности, содержания, вещественного выражения геологических процессов образования мезотермальных месторождений золота южного горно-складчатого обрамления Сибирского кратона оценить источники металлоносных рудообразующих растворов.

Методы: изучение последовательности образования, минералого-химических составов, сопровождающих плутоны, массивы гранитоидов, ультраметаморфические очагово-купольные постройки даек магматических пород, пространственно-временных соотношений их между собой и с рудно-минеральными комплексами, полный химический (мокрый) силикатный анализ горных пород, рентгено-спектральный анализ химических составов минералов, анализ изотопных составов серы сульфидов и углерода карбонатов руд и околорудных метасоматитов, петрохимические пересчеты.

Результаты. Приведены доказательства генерации образующих мезотермальные месторождения золота металлоносных растворов в мантийных очагах базитовых расплавов – факты одновременного функционирования последних и рудообразующих растворов в коре после кристаллизации гранитных расплавов, данные о флюидопроводящей в горячем состоянии функции внутрирудных даек долеритов – наряду с разломами путей подъема металлоносных растворов из очагов генерации в образующиеся месторождения, факты наследования околорудными метасоматитами (березитами) петрохимического профиля внутридайка аподолеритового метасоматизма (привнос K, CO₂, S, вынос Na, Si), контрастных аномалий фемофильных элементов (P, Ti, Ca, Mg, Fe, Mn), близкие к мантийным меткам изотопные отношения серы сульфидов и углерода карбонатов. Обсуждается негативное влияние человеческого фактора на решение проблемы, которое заключается в приоритете представлений о генерации металлоносных растворов в коровых очагах гранитных расплавов – предложенной авторитетом, поддержанной массами руководящей идеи при том, что идея не соотносится с наблюдаемыми в месторождениях, в том числе известными с пятидесятих годов прошлого столетия фактами, которые не вписываются в представления и поэтому не привлекаются для оценки жизнеспособности идеи. Между тем, факт одновременного функционирования базитовых очагов в мантии и образующих мезотермальные месторождения цветных металлов растворов в коре после кристаллизации гранитных расплавов доказываем существованием и в этих месторождениях послегранитных дорудных, внутрирудных даек базитов – носителей информации об источниках металлоносных растворов. Этот факт свидетельствует об образовании мезотермальных месторождений цветных металлов и золота по одному сценарию, поэтому рекомендуется решать проблему обусловленности мезотермального рудообразования магматизмом в месторождениях цветных металлов в согласии с рекомендациями Ф.И. Вольфсона и В.Н. Котляра шестидесятилетней давности по программе описанного в статье исследования.

Ключевые слова:

Мезотермальные месторождения золота и цветных металлов, обусловленность рудообразования магматизмом, плутоны гранитоидов, дорудные, внутрирудные, послерудные дайки базитов, дайки-флюидопроводники, петрохимический профиль внутридайка аподолеритового и околорудного метасоматизма, контрастные аномалии фемофильных элементов, изотопные отношения серы сульфидов и углерода карбонатов, человеческий фактор.

Постановка задачи

Потребовалось полтора столетия после обращения к соотечественникам призыва предтечи металлогении русского гения М.В. Ломоносова пойти по своему отечеству и рассматривать расположение мест, «... к производству руды способных и неспособных», прежде чем начались систематические массовые исследования геологических процессов на предмет оценки их способности к рудообразованию. В приложении к мезотермальным по классификации В. Линдгрена [1] месторождениям золота с сопровождающими цветными металлами, полиметаллическим с сопровождающим золотом, оловянным, вольфрамовым, урановым рудам в двадцатом столетии и до сего времени в реконструкции условий генерации металлоносных флю-

идов достигнуты более чем скромные результаты – предложены четыре конкурирующие обсуждаемые в среде специалистов многих стран известные гипотезы их образования – гранитогенная, базальтогенная, метаморфогенная, полигенная.

Магматогенные гипотезы предполагают генерацию металлоносных флюидов в очагах гранитных или базитовых магм и образование оруденения независимо от составов и происхождения вмещающей руды среды в соответствии с размещением месторождений в разломных структурах разных масштабов и их обрамлении, определяющих пути миграции и места концентрирования и консервации флюидов в земной коре. Сфера приложения метаморфогенной и полигенной гипотез – черносланцевые комплексы с повышенными против

кларка содержаниями седиментогенного золота, переотлагаемого, как считается, из пород в руды в процессах функционирования метаморфогенных и/или магматогенных флюидов.

К обоснованию наиболее популярной из двух магматогенных гипотез, судя по числу и содержанию публикаций, гранитогенной гипотезы привлекались и привлекаются следующие факты:

- пространственная и временная близость мезотермальных месторождений к предшествующим им массивам, плутонам гранитоидов [2–12] и, в подтверждение представлений В. Эммонса [13], признаки зонального расположения гидротермальных месторождений относительно интрузий гранитоидов [2, 14–16];
- крупные объемы и высокая обводненность унаследованных массивами, плутонами с ассоциированными мезотермальными месторождениями гранитных расплавов, способных генерировать металлоносные растворы в количествах, достаточных, как считается, для образования промышленных месторождений. Этот факт в середине XX столетия для доказательства генетических связей мезотермального рудообразования с гранитоидным магматизмом считался важнейшим. Вероятно, Х.М. Абдуллаев выражал мнение большинства, считая, что «для выдвигания тезиса, что нижний магматический очаг базальтово-перидотитового состава является источником самостоятельных рудных растворов, пока достаточных оснований нет. К тому же, как известно, трещинные излияния базальтов и их субэффузивные дайки не образуют таких месторождений, которые можно было бы связать с деятельностью очага основных и ультраосновных магм» [17. С. 207];
- образование гранитоидных массивов, плутонов палингенных гранитоидов в некоторых районах в блоках земной коры, обогащенных золотом и, как следствие, обогащение расплавов металлом и приобретение им золотопродуцирующей способности [4, 5, 14, 18], подтвержденной физико-химическим анализом условий функционирования гранитных расплавов [19] и в экспериментах [20];
- накопление золота в конечных обогащенных флюидной фазой дифференциатах гранитоидного магматизма в некоторых районах [8, 21, 22] или снижение против кларка его содержания в других [10, 23];
- сходные составы газовой фазы флюидов (CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_6 и др.), извлеченной из включений минералов золотоносных кварцевых жил и гранитоидов, как признак генетической связи между ними [24];
- наследование золотоносными кварцевыми жилами минералов гранитоидов (полевых шпатов и др.) [25].

Вопреки упомянутому утверждению Х.М. Абдуллаева, отрицающему известный тезис о том, что дьявол – в мелочах, и разделяемому многими

опирающемуся на перечисленные факты мнению, основания для привлечения «нижнего магматического очага базальтово-перидотитового состава» к обсуждению проблемы были и они опубликованы за несколько лет до выхода его цитированной монографии.

Известный исследователь гидротермальных месторождений Ф.И. Вольфсон обращал внимание на то, что «Без *детального* (курсив наш, – И.К.) изучения в каждом отдельном случае геологического положения даек интрузивных пород и их взаимоотношений с оруденением мы не можем решить вопрос о генетической связи оруденения с определенными массивами гранитоидов» [26. С. 46]. Согласно другому известному ученому В.Н. Котляру, «... при изучении связи оруденения с магматическими породами необходимо установить связь оруденения не только с интрузивными массивами и магматическими комплексами в целом, но также с отдельными последовательными магматическими проявлениями», поскольку «... отдельные фазы интрузий и особенно фазы, растянутые во времени, имеют свои жильные отщепления... При таком положении очень важно бывает установить отношения между оруденением и жильными отщеплениями, поймать, как говорят, оруденение или отдельные его этапы «в вилку жильных пород»» [27. С. 68, 69].

Приведенные рекомендации послужили импульсом к изданию специального посвященного обсуждаемой проблеме выпуска журнала Известия АН СССР. Серия геологическая, 1957, № 1 и получили обоснование в серии статей этого выпуска. В оловянных, вольфрамовых, полиметаллических гидротермальных месторождениях Забайкалья и Приморья диагностированы в разных сочетаниях и описаны послегранитные дорудные, внутрирудные, послерудные дайки диабазов [28–31], «взявшие» руды в возрастные вилки.

Было сделано многое для того, чтобы уточнить для занятого решением проблемы ученого сообщества направление дальнейших исследований, – факты указывают на одновременное функционирование отнюдь не гранитных, но базитовых магматических очагов в мантии и рудообразующих металлоносных растворов над базитовыми очагами в коре *после образования рудовмещающих гранитных массивов, плутонов*. Казалось бы, эти данные должны были инициировать детальное изучение наряду с гранитами базитовых даек «второго этапа» (по В.С. Коптеву-Дворникову) на предмет оценки участия базитовых расплавов в рудообразовании, поскольку они (дайки) не вписываются в гранитогенную гипотезу. Этого не произошло – включился мощный человеческий фактор. По предложению Л.В. Таусона [32] произошло всего лишь смена концепции о металлогенической специализации гранитоидов на сохраняющуюся до сих пор популярным представлении об их потенциальной рудоносности, рудной продуктивности и зависимости последней от условий функциониро-

вания гранитных расплавов в магматических камерах.

Переход большей части ученого сообщества, занятого исследованием проблемы, сохранившего приверженность к гранитоидным расплавам как генераторам металлоносных растворов, ведомого академиком на позиции новой концепции, стимулирован ставшим очевидным к семидесятым годам прошлого столетия отсутствием корреляции между металлоносностью гранитоидов и мезотермальными месторождениями золота, цветных металлов в сочетании с другими упомянутыми фактами, раскрывающими возможные генетические связи между месторождениями и гранитоидами [21–23 и др.].

Предложение Л.В. Таусона о смене концепции воспринято, если судить по не всегда корректному признаку – числу и содержанию русскоязычных, англоязычных публикаций, с энтузиазмом. Вероятно, этому способствовали упомянутые факты: пространственно-возрастная близость месторождений к массивам гранитоидов, крупные объемы заполненных гранитными расплавами магматических камер, высокая обводненность гранитных расплавов, могущих в потенциале обеспечивать генерацию значительных масс металлоносных растворов.

В течение последних десятилетий в плане реализации предложения реконструируются термодинамические, физико-химические режимы функционирования гранитных расплавов – температуры, давления, кислотно-основные, окислительно-восстановительные условия в очагах гранитной магмы, фугитивности, парциальные давления летучих, распределение и эволюция концентраций в расплавах и минералах золота, цветных металлов, элементов, обладающих высоким сродством с металлами (Cl, S и других), оценивается эманационная дифференциация магм и возможности эманационного концентрирования рудных элементов в остаточных расплавах, условия и масштабы дегазации потенциально рудоносных магм как показатели их рудной продуктивности [3, 6–8, 10, 33–57]. В итоге гранитоиды, слагающие крупные тела, по совокупности данных оцениваются на предмет возможных генетических связей с ними месторождений, и в случае положительной оценки при существовании непосредственно сменяющих во времени гранитоиды мезотермальных месторождений последние получают статус «pluton-related», «intrusion-related» – родственных, генетически связанных с гранитами. В подобных случаях противоречащие этой связи факты образования дорудных, внутрирудных, послерудных даек базитов остаются необъясненными, а связи гипотетическими.

О дайках базитов «второго этапа», чередующихся во времени с рудно-минеральными комплексами, поддерживающие гранитогенную гипотезу авторы публикаций, как правило, не вспоминают, очевидно, по причине невозможности объяс-

нить с позиции этой гипотезы необъяснимое. Вместе с тем в последние десятилетия накапливаются в приложении, в частности, к мезотермальным месторождениям золота новые факты, которые в совокупности дополняют и усиливают аргументацию альтернативной базальтогенной гипотезы [58–76 и др.].

В статье обобщены и обсуждаются в основном авторские материалы, составляющие и дополняющие доказательную базу золотопродуцирующей системы [73] в составе ее производных – ранних гранитоидов, поздних базальтоидов и мезотермальных месторождений золота, образованных на позднем базальтоидном этапе ее функционирования. Дополнительные материалы получены в результате изучения в мезотермальных месторождениях золота наряду с другими магматическими породами, образованных в период, переходный от гранитоидного петрохимического профиля магматизма к базальтоидному, в течение которого можно было ожидать как неизбежное смещение остаточных гранитоидных коровых и поступавших из мантии базитовых расплавов в одних магматических камерах и, как следствие, – генерацию золотоносных растворов в смешанных расплавах. В свою очередь, отсутствие признаков смешения тех и других расплавов с учетом повторяющихся во многих месторождениях фактов инъекции ранней порции металлоносных растворов после внедрения ранних порций послегранитных базитовых расплавов будет означать генерацию растворов в уже не существовавших остаточных гранитоидных расплавах, что невозможно, следовательно, – генерацию растворов в продолжавших функционировать очагах базитовых магм.

Поиски индикаторов кристаллизации подобных смешанных расплавов – «гибридных» даек, минглинг-даек, и обобщение, включая дополнительные факты, раскрывающих генерацию золотоносных растворов в автономных очагах базитовых расплавов, составили задачу исследования.

Вместе с тем приведенные материалы согласуются с данными, опубликованными в серии статей упомянутого академического журнала и раскрывающими образование рудно-минеральных комплексов оловянных, вольфрамовых, полиметаллических месторождений в чередовании с дайками базитов *после становления гранитных массивов*. Эти данные подчеркивают образование мезотермальных руд золота и цветных металлов по одному сценарию, которому следует природа. Поэтому усиливается целесообразность актуализировать рекомендации Ф.И. Вольфсона и В.Н. Котляра исследовать в мезотермальных месторождениях цветных металлов (Sn, W, Mo, Cu, Pb-Zn, Ni-Co, Sb) сопровождающие массивы, плутоны гранитоидов дайковые ассоциации, в том числе и прежде всего базитовые, на предмет поиска вещественных признаков флюидопроводящей функции базитовых даек, которые через эту функцию в золотых месторождениях связывают корни даек в очагах

базитовых расплавов в мантии с месторождениями золота в коре [58, 63, 67, 68, 72]. Поиску способствует тот факт, что фильтрующиеся в горячих базитовых дайках металлоносные растворы оставляют вещественные признаки – следы в минеральном, химическом, геохимическом составах образующихся в дайках метасоматитов.

Поскольку условия накопления рудообразующих растворов, создающих одни и те же месторождения, объясняются с противоположных позиций той и другой концепций, сохраняется потребность дальнейшего поиска фактов для корректного решения этой одной из ключевых столетних проблем теории гидротермального рудообразования и металлогении. Потребность корректного решения данной теоретической проблемы сочетается с возрастающей необходимостью для восполнения минерально-сырьевой базы металлов создания теоретической основы комплекса эффективных прогнозно-поисковых критериев месторождений, находящихся на приемлемых глубинах, но не вскрытых эрозией, что в условиях сосуществования взаимно исключаящих одно другое представлений невозможно.

Объекты – мезотермальные месторождения золота и методы исследования

В перечисленных ниже мезотермальных месторождениях золота южного горно-складчатого обрамления Сибирского кратона (рис. 1, 2) выполнено комплексное исследование обсуждаемой про-

блемы по программе, включающей изучение сопровождающих плутоны, массивы гранитоидов ассоциаций послегранитных жильных магматических пород основного состава – даек, образованных в процессах рудообразования в чередовании с рудно-минеральными комплексами, околорудных метасоматических ореолов и руд.

Месторождение Чертово Кoryто (средний палеозой?) на севере Патомского нагорья в составе залежи прожилково-вкрапленных кварцево-сульфидных руд, образованной в толще черных сланцев раннепротерозойской михайловской свиты.

Месторождения Сухой Лог, Вернинское (средний палеозой) в Ленском районе в составе залежей прожилково-вкрапленных кварцево-сульфидных руд, образованных в толщах черных сланцев позднерифейских имняхской, хомолхинской, аунакитской, вачской свит.

Верхне-Сакуканское кварцево-жильное месторождение (285 ± 5 млн л. [77]) в Северном Забайкалье, образованное в гранитоидном массиве раннепротерозойского кодарского комплекса.

Уряхское кварцево-жильное месторождение (поздний палеозой) в Северном Забайкалье, образованное в толщах дифференцированных покровных вулканитов позднерифейской келянской и черных сланцев позднерифейской водораздельной свит.

Каралонское месторождение (275 ± 7 млн л. [77]) в Северном Забайкалье в составе залежей прожилково-вкрапленных кварцево-сульфидных руд



Рис. 1. Расположение золоторудных районов в южном горно-складчатом обрамлении Сибирского кратона: I – Енисейский; II – Кузнецко-Алатауский; III – Окино-Китойский; IV – Северо-Забайкальский (Муиский); V – Ленский

Fig. 1. Arrangement of the gold-ore regions in South mountain-folded frame of the Siberian craton: I – Eniseysky; II – Kuznetsko-Alatau; III – Okino-Kitoysky; IV – Severo-Transbaikalsky (Muisky); V – Lensky

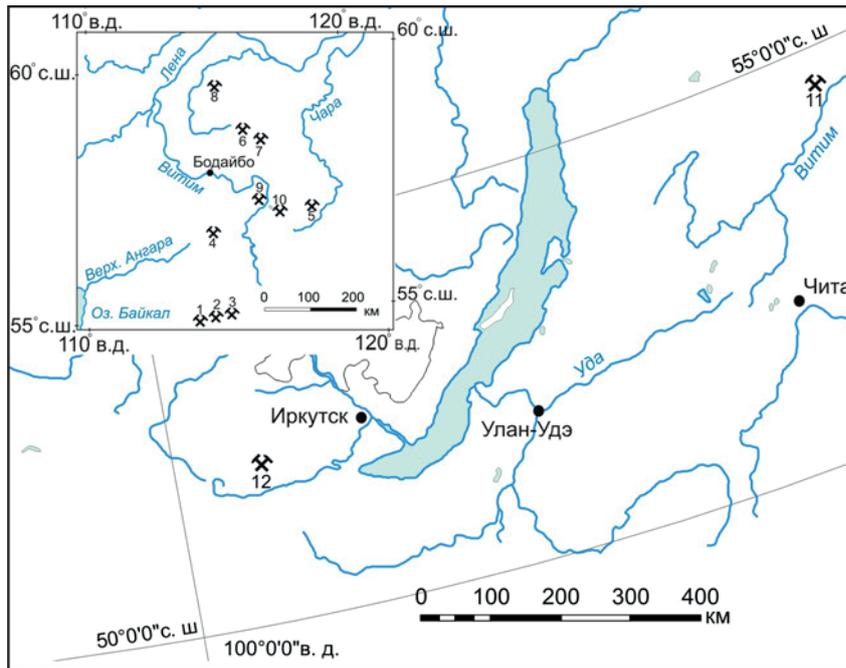


Рис. 2. Географическое положение золоторудных месторождений в Окино-Китойском, Муйском, Ленском районах: 1 – Западное; 2 – Ирокиндинское; 3 – Кедровское; 4 – Богодиканское; 5 – Верхне-Сакуканское; 6 – Сухой Лог; 7 – Вернинское; 8 – Чертово Корыто; 9 – Каралонское; 10 – Уряхское; 11 – Кедровское; 12 – Зун-Холба

Fig. 2. Geographical arrangement of the gold-ore deposits in Okino-Kitoysky, Muysky, Lensky regions: 1 – Zapadnoe; 2 – Irokindinskoe; 3 – Kedrovskoe; 4 – Bogodikanskoe; 5 – Verkhne-Sakukanskoe; 6 – Sukhoy Log; 7 – Verninskoe; 8 – Chortovo Koryto; 9 – Karalonskoe; 10 – Uryakhsкое; 11 – Kedrovskoe; 12 – Zun-Kholba

и золоторудных кварцевых жил, образованных в толщах покровных вулканитов позднерифейской келянской и черных сланцев позднерифейской водораздельной свит, в массивах гранитоидов позднерифейско-вендского падоринского и позднепалеозойского конкудеро-мамаканского комплексов.

Богодиканское кварцево-жильное месторождение (303 ± 5 млн л. [77]) в Северном Забайкалье, образованное в массиве гранитоидов позднепалеозойского конкудеро-мамаканского комплекса.

Кедровское кварцево-жильное месторождение (282 ± 5 млн л. [77]) в Северном Забайкалье, образованное в толще черных сланцев позднерифейской кедровской свиты и в позднепалеозойской зрелой очагово-купольной ультраметаморфической постройке с гранодиоритовым ядром.

Ирокиндинское кварцево-жильное месторождение (277 ± 4 млн л. [77]) в Северном Забайкалье, образованное среди гнейсов, мигматитов, гранитов архейского фундамента.

Западное кварцево-жильное месторождение (275 ± 5 млн л. [77]) в Северном Забайкалье, образованное в массиве габбро и гранитоидов позднерифейского муйского комплекса.

Кварцево-жильное месторождение Зун-Оспа (средний палеозой), образованное на юго-востоке Восточного Саяна в Амбартогальском массиве гранитоидов среднепалеозойского холбинского комплекса.

Месторождение Зун-Холба (средний палеозой) в составе залежей прожилково-вкрапленных кварцево-сульфидных руд, образованных на юго-востоке Восточного Саяна в толще карбонатно-терригенных осадочных пород позднерифейской ильчирской свиты.

Центральное кварцево-жильное месторождение (ранний палеозой) в Кузнецком Алатау, образованное в гранитоидах Центрального массива раннепалеозойского мартайгинского комплекса.

Берикульское кварцево-жильное месторождение (ранний палеозой) в Кузнецком Алатау, образованное в толще дифференцированных вулканитов берикульской свиты (Є₁).

В перечисленных месторождениях изучены условия залегания даек, пространственно-временные соотношения их с гранитоидами, между собой и с рудно-минеральными комплексами, минеральные, химические составы магматических и метасоматических пород, химические составы минералов, минералого-петрохимические профили окорудного и внутридайкового метасоматизма, изотопные составы углерода карбонатов метасоматитов, серы сульфидов руд, абсолютный возраст минералов метасоматитов.

Посредством изучения газовой-жидких включений в минералах реконструированы термодинамические, физико-химические режимы и последовательность образования рудно-минеральных комплексов (Е.А. Вагина-Синкина).

Микроскопическое изучение горных пород выполнено в поляризационном микроскопе ПОЛАМ-Р312.

Химические составы минералов определялись в электронном сканирующем микроскопе JSM-6510LV CAMEBAX-MICRO с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350+ в Аналитическом центре Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) аналитиком М.В. Хлестовым.

Полные химические силикатные анализы горных пород (мокрые) выполнены в Западно-Сибирском Испытательном центре (г. Новокузнецк) под руководством Г.Н. Юминовой и в Центральной лаборатории ПГО «ЗапСибгеология» (г. Новокузнецк) под руководством И.А. Дубровской.

Абсолютный возраст серицита околорудных березитов золоторудных месторождений определен в Центральной лаборатории ПГО «ЗапСибгеология», аналитик В.М. Кисенко.

Изотопные исследования серы сульфидов и углерода карбонатов выполнены в лабораториях Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института цветных металлов и золота (г. Москва) и Всероссийского научно-иссле-

дательского геологоразведочного нефтяного института (г. Москва).

Петрохимические расчеты межзональной миграции петрогенных компонентов в процессах внутридайкового аподолеритового и околорудного метасоматизма горных пород выполнены по объемно-атомному методу.

Последовательность, содержание и вещественное выражение геологических событий в процессах образования мезотермальных месторождений золота

Корректная реконструкция геологических, в том числе рудообразующих, процессов – необходимое условие создания, совершенствования теории рудообразования в процедуре познания того, как образуются месторождения полезных ископаемых на планете Земля, достигается доказательством содержания, последовательности их функционирования и составами оставленных ими вещественных «следов» – горных пород и руд.

В возрастном диапазоне от позднего протерозоя до раннего мезозоя в процессах образования мезотермальных месторождений золота южного горно-складчатого обрамления Сибирского кратона

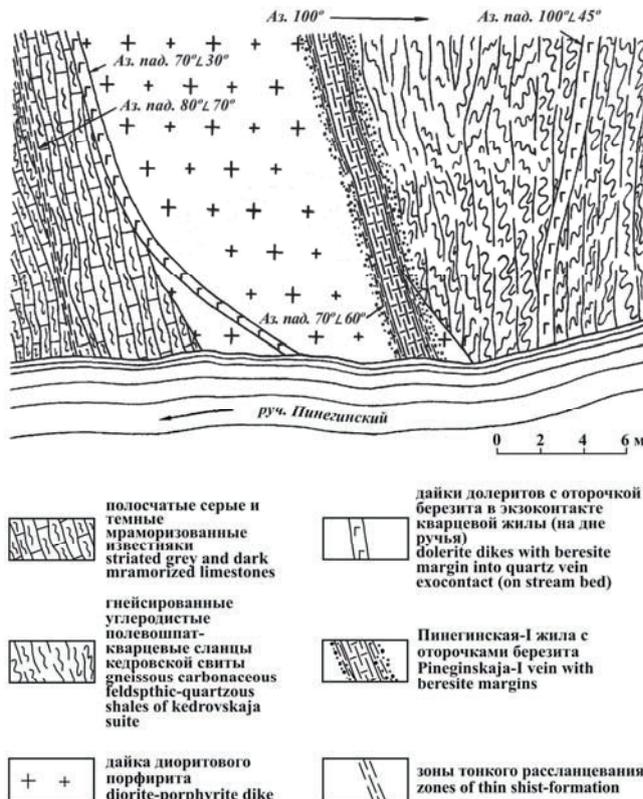


Рис. 3. Ранний (гранитоидный) этап и начало позднего базальтоидного этапа становления антидромного флюидно-рудно-магматического комплекса на примере Кедровской зрелой ультраметаморфической очагово-купольной структуры. Кедровское месторождение. Пересечение дорудной дайкой долерита и сульфидно-кварцевой Пинегинской-I жилы дорудной дайки диоритового порфирита (план)

Fig. 3. Early (granitoid) stage and beginning of late basaltoid stage of the antidromic fluid-ore-magmatic complex formation on the example of Kedrovskaya mature ultrametamorphic hearthly-dome structure. Kedrovskoe deposit. Intersection of diorite porphyry dike by dolerite till-ore dike and Pineginskaya sulphide-quartz vein (plan)

выдерживается (повторяется) однообразная последовательность близких по геологическому времени событий, непосредственно предшествовавших рудообразованию, инициировавших, сопровождавших и завершавших его.

В результате реализации этих событий образованы антидромные гранит-диорит-долеритовые магматические комплексы [77], в составе которых объединяются близкие по геологическому возрасту магматические производные земной коры и мантии, а также участвуют мезотермальные месторождения золота, вероятно, цветных металлов и урана.

На раннем гранитоидном этапе становления комплексов геологические события начинаются с внедрения в земную кору по зонам глубинных (сверхглубинных) разломов высокотемпературных флюидов-теплоносителей, которые на путях подъема из глубинных геосфер Земли создают «горячие точки» – плавят субстрат мантии и земной коры, в земной коре, кроме того, формируют ультраметаморфические, в том числе зрелые, очаговокупольные структуры (рис. 3). Помимо палингенеза и ультраметаморфизма, посредством которых природа решает проблему пространства, она также использует механизм магматической дифференциации базитовых расплавов вплоть до образования диоритовых и гранитных выплавок. В итоге образуются плутоны, массивы гранитоидов, диоритоидов, дайки которых в составе микродиоритов, диоритовых порфиритов, аплитов, пегматитов, гранит-порфиритов, фельзит-порфиритов и других магма-

тических пород от среднего до кислого составов в случаях незначительного эрозионного среза маркируют нескрытые крупные гранитные тела.

В начале позднего (второго, по В.С. Коптеву-Дворникову) базальтоидного этапа формирования антидромных магматических комплексов менее подвижные сравнительно с ранними газовыми флюидами-теплоносителями слабо дифференцированные до умеренно щелочных ранние порции базитовых расплавов поднимаются по системам подновленных ранних глубинных разломов в верхние горизонты земной коры, в том числе до уровней будущего рудообразования, преодолевая большую часть объемов образованных на раннем этапе плутонов, массивов гранитоидов, диоритоидов. На своем пути из мантийных очагов базитовые расплавы ранней (дорудной) порции и, возможно, последующих порций могут смешиваться с остаточными гранитными расплавами, по версии гранитогенной концепции, – источниками металлоносных растворов, вероятно, в низах бывлых магматических камер. Образовавшиеся в результате кристаллизации смешанных расплавов «гибридные» магматические породы, в частности минглинг-дайки, могли бы служить, как отмечалось, индикаторами сосуществования остаточных гранитных и базитовых расплавов в одних магматических камерах.

Активизация на позднем этапе базитовых очагов мантии сопровождается внедрением в верхние горизонты земной коры в пульсационном режиме базитовых расплавов в чередовании с инъекциями металлоносных растворов (рис. 4), фильтрова-

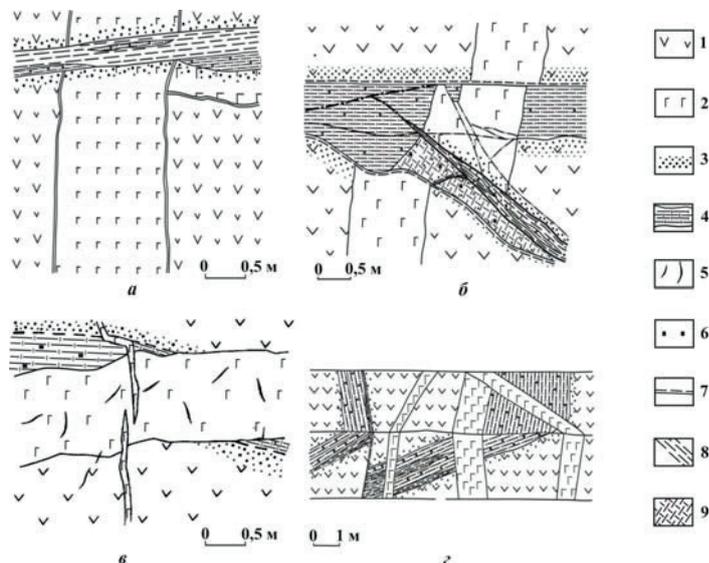


Рис. 4. Поздний (базальтоидный) этап становления антидромного флюидно-рудно-магматического комплекса. Беркульское месторождение. Структурно-временные соотношения золотых руд с дорудными (две генерации, а), внутрирудными (б), послерудными (две генерации, в, г) дайками умеренно щелочных долеритов. Базальтовые порфириты (E1) (1), дайки умеренно щелочных долеритов (2), березиты (3), золотоносные кварцевые жилы, прожилки (4), карбонатно-кварцевые прожилки (5), пирит (6), тектонические швы (7), зоны расщепления и дробления пород (8, 9)

Fig. 4. Late (basaltoid) stage of the antidromic fluid-ore magmatic complex formation. Berikulsкое deposit. Structurally-temporary correlations of gold ores with till-ore (two generations, a), inside-ore (б), after-ore (two generations, в, г) dikes of moderately alkaline dolerites. Basalt porphyrite (E1) (1), moderately alkaline dolerites dikes (2), beresites (3), gold-bearing quartz veins, veinlets (4), carbonate-quartz veinlets (5), pyrite (6), fractures (7), schist formation zones (8, 9)

Таблица 1. Химические составы титан-авгита даек умеренно щелочных долеритов

Table 1. Chemical compositions of the Ti-augite of the moderately alkaline dolerite dikes

Рентгено- спектры X-ray-spectra	Содержание, мас. % / Content, wt. %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	FeO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Σ
*	46,47...51,86	2,33...10,55	0,00...0,28	0,00...0,43	18,92...23,34	12,07...15,06	6,39...17,28	0,50...2,96	0,00...1,06	0,01...0,30	
1	47,89	7,13	–	0,43	22,75	13,38	6,32	1,37	0,73	–	100,00
2	46,25	8,59	0,10	0,43	22,17	11,88	8,89	1,46	–	0,17	99,94
3	44,87	10,13	–	0,44	22,36	11,21	8,81	2,18	–	–	100,00
4	48,60	6,70	–	0,40	22,62	13,88	6,21	1,21	0,39	–	100,01
5	46,40	7,17	–	0,47	22,70	10,85	10,94	1,48	–	–	100,01

Примечание. 1) В FeO дано валовое содержание железа; 2) * – интервалы нормативных содержаний петрогенных компонентов [78].

Note. 1) Fe gross content is in FeO; 2) * – the intervals of the petrogenous components normative contents.

шихся по разломам и внутрирудным дайкам долеритов, в горячем состоянии – флюидопроводникам, и образовавшихся в разломах руды в составе рудно-минеральных комплексов [73] и сопровождающие их околорудные метасоматиты, во внутрирудных дайках-флюидопроводниках – аподолеритовые метасоматиты. Завершаются геологические события внедрением в блоки рудообразования поздних порций базитовых расплавов, создавших не менее двух генераций даек послерудных долеритов (рис. 4, в).

Дайки базитов всех генераций мощностью до 2,0...2,5 м и протяженностью до сотен...многих сотен метров образованы в массивах ранних гранитоидов антидромных комплексов и во вмещающих их породах и пересекают все дайки сопровождающих массивы кислых...средних магматических пород.

В составе даек базитов диагностированы оливин-содержащие пикродолериты, долериты, умеренно щелочные долериты, лейкодолериты (далее долериты). Породы черного цвета сложены мелко-до среднезернистого полнокристаллическим агрегатом преобладающего лабрадора до андезина на периферии кристаллов и Ti-авгита (табл. 1) с примесью оливина, калиевого полевого шпата (табл. 2), титаномагнетита, титаниста, ильменита, апатита. Текстура массивная, структуры офитовая, долеритовая, порфиоровая с размером зерен основной массы в пределах десятых долей мм, порфиоровых вкрапленников лабрадора и авгита – до 1,0...2,0 мм. Во вкрапленниках авгита участвуют монокристаллы и их сростки.

Таблица 2. Химические составы калиевого полевого шпата даек умеренно щелочных долеритов

Table 2. Chemical compositions of the potassic feldspar of the moderately alkaline dolerite dikes

Рентгено- спектры X-ray-spectra	Содержание, мас. % / Content, wt. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	FeO	Σ
1	63,08	20,26	10,19	3,56	2,09	0,28	0,53	99,99
2	64,78	19,45	12,68	2,39	0,71	–	–	100,01
3	64,35	19,55	12,40	2,37	0,98	–	0,35	100,00
4	64,14	19,53	12,82	2,39	0,72	–	0,41	100,00
5	64,00	19,86	11,57	2,92	1,31	–	0,34	100,00
6	63,51	20,37	11,43	2,96	1,45	–	0,27	99,99

Минералого-петрохимическая зональность околорудных метасоматических ореолов-колонок в послегранитных дорудных дайках долеритов и их минералого-химические составы

Ранние послегранитные, но дорудные дайки долеритов сопровождаются особенно охотно среди ранних гранитоидов комплексов (рис. 4) или пересекаются золоторудными кварцевыми жилами, в экзоконтактах последних подверглись метасоматическим изменениям с образованием околужильных зональных ореолов-колонок (табл. 3). Колонки сочетают в своем составе минеральные ассоци-

Таблица 3. Минеральная зональность околорудных метасоматических ореолов-колонок в послегранитных дорудных дайках долеритов

Table 3. Mineral zoning of the near-ore metasomatic halocolumns into after-granitic till-ore dolerite dikes

Минеральные зоны Mineral zones	Минеральный состав Mineral composition
Фронтальная Frontal	Кварц+серицит+рутил+лейкоксен+магнетит±пирит±кальцит+альбит±хлориты±цоизит±эпидот±актинолит±тремолит Quartz+sericite+rutile+leucoxene+magnetite±pyrite±calcite+albite±chlorites±zoisite±epidote±actinolite±tremolite
Хлоритовая Chloritic	Кварц+серицит+рутил+лейкоксен+магнетит+пирит±кальцит±доломит+альбит±хлориты±цоизит±эпидот Quartz+sericite+rutile+leucoxene+magnetite+pyrite±calcite±dolomite+albite±chlorites±zoisite±epidote
Альбитовая Albitic	Кварц+серицит+рутил+лейкоксен+магнетит+пирит±кальцит±доломит±анкерит±сидерит+альбит±апатит±сульфиды±золото±серебро Quartz+sericite+rutile+leucoxene+magnetite+pyrite±calcite±dolomite±ankerite±siderite+albite±apatite±sulphides±gold±silver
Тыловая Rear	Кварц+серицит+рутил+лейкоксен+магнетит+пирит±кальцит±анкерит±сидерит±брейнерит±апатит±сульфиды±золото±серебро Quartz+sericite+rutile+leucoxene+magnetite+pyrite±calcite±ankerite±siderite±breunerite±apatite±sulphides±gold±silver

Примечание. Подчеркнуты минералы, исчезающие в более тыловых зонах.

Note. The minerals disappearing in more rear zones are underlined.

ации березитовой метасоматической формации в тылу и пропилитовой – на периферии. Мощность тыловых березитовой и альбитовой зон, сложенных осветлёнными метасоматитами, в массивных долеритах, как правило, не превышает 0,2...0,3 м, в трещиноватых породах достигает 1,5 м. В сопровождаемых кварцевыми жилами дайках эпигенетические минеральные ассоциации периферийных зон (хлорит, эпидот, цоизит, актинолит, тремолит) участвуют в составе пород на всю оставшуюся от тыловых зон мощность. Во фронтальной зоне сохраняются реликтовые цветные минералы (авгит, оливин) исходной породы; последняя, как правило, слабо изменена, содержит до 10 об. % эпигенетических минералов.

Сочетание в одном околожильном ореоле метасоматитов двух, березитовой и пропилитовой, метасоматических формаций не исключает принадлежность минералого-петрохимических зон к одной метасоматической колонке, объединяющей одновременно образованные минералого-петрохимические зоны в результате одного (общего) процесса. Это доказывается повторяющимися в месторождениях: 1) исчезновением минералов в более тыловых зонах вследствие растворения их на внутренней границе каждой зоны при сохранении, вопреки теории метасоматической зональности Д.С. Коржинского [76], сопоставимого числа минералов в каждой, включая тыловую, зоне посредством замены растворенных минералов новообразованными; 2) одним порядком минеральной зональности, выраженным в растворении цветных минералов исходных пород на внутренней границе фронтальной зоны, хлорита или эпидота – на вну-

тренних границах хлоритовой, эпидотовой зон, альбита – на внутренней границе альбитовой зоны; 3) одним порядком петрохимической зональности, выраженным в выносе из пород возрастающей в направлении к тыловой зоне массы кремнезема (до 50 мас. %), натрия (до 95 мас. % Na₂O), привносе в породы растворами извне и фиксации калия в сериците, серы в сульфидах, углекислоты в карбонатах (табл. 4), в обрамлении глубинных разломов – феофильных элементов (P, Ti, Mg, Fe, Ca, Mn), образующих в тыловых зонах контрастные аномалии [76].

В условиях метасоматических процессов березитового профиля наиболее подвижная углекислота, достигающая в околожильных метасоматических колонках фронтальной зоны в бескарбонатных исходных породах, наряду с удельной массой перемещенного вещества (Δ) и минеральным составом метасоматитов служит индикатором интенсивности метасоматических преобразований пород.

Приведенные химические составы базитовых даек, опробованных на разных участках месторождений, содержащих во фронтальной зоне незначительную примесь (до 5...10 об. %) эпигенетических минералов этапов околорудного метасоматизма или без таковых, демонстрируют незначительные вариации содержаний петрогенных компонентов – повышение или понижение кремнекислотности, повышение щелочности пород – явления, обусловленные слабо проявленной дифференциацией магматических расплавов без признаков смешения их с расплавами существенно иного состава (табл. 5).

Таблица 4. Баланс (привнос >1, вынос <1) петрогенных элементов в минералого-петрохимических зонах околожильных метасоматических колонок, образованных в долеритах послегранитных дорудных даек золоторудных месторождений Южной Сибири

Table 4. Balance (addition >1, carry out <1) of petrogenous elements in mineral-petrochemic zones of the near-ore metasomatic columns formed in after-granitic till-ore dolerite dikes of mesothermal gold-ore deposits of South Siberia

Минералого-петрохимические зоны (число проб) Mineral-petrochemical zones	Si	Al	K	Na	S	C	Ca	Mg	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Ti	Mn	P	H ⁺ (H ₂ O)	O	Δ
Бериккульское месторождение/Berikulsкое deposit																
Хлоритовая (1)/Chloritic	1,0	1,0	0,8	1,2	1,1	0,9	1,0	1,2	1,1	0,5	1,0	1,1	1,3	0,7	1,0	4,0
Альбитовая (1)/Albitic	0,9	1,0	1,7	0,5	0,4	2,9	1,3	0,8	0,6	1,4	1,0	0,6	1,2	0,6	1,0	10,8
Тыловая (1)/Rear	0,9	1,0	2,1	0,1	8,5	4,1	1,2	1,0	0,6	0,6	1,1	0,7	1,3	0,5	1,0	15,1
Западное месторождение/Zapadnoe deposit																
Хлоритовая (9)/Chloritic	0,9	0,9	2,2	1,0	0,8	10,0	0,9	0,8	0,9	0,5	0,9	0,8	0,6	0,9	1,0	11,0
Альбитовая (2)/Albitic	0,8	0,9	5,4	0,5	1,3	15,0	0,8	0,9	1,1	0,1	0,9	0,8	0,6	1,0	1,1	20,0
Тыловая (5)/Rear	0,8	0,8	6,5	0,1	1,6	16,0	0,9	1,0	1,0	0,4	0,8	0,6	0,5	1,3	1,1	21,0
Богодиканское месторождение/Bogodikansкое deposit																
Хлоритовая (4)/Chloritic	0,9	0,9	1,3	0,8	0,8	29	0,8	1,1	0,9	0,6	0,8	0,9	0,7	1,3	1,0	12,5
Альбитовая (1)/Albitic	0,8	0,7	2,2	0,6	0,6	51	0,8	0,9	1,1	0,3	0,9	1,0	0,8	0,7	1,1	20,7
Тыловая (2)/Rear	0,8	0,9	3,1	0,1	0,9	42	0,9	1,0	1,0	0,3	0,7	0,8	0,6	1,4	1,1	19,3

Примечание. 1) Коэффициенты распределения элементов в метасоматитах относительно умеренно щелочного долерита фронтальной зоны; 2) S – сера сульфидная, C – углерод карбонатный; 3) Δ – удельная масса перемещенного (привнесенного и вынесенного) вещества в процентах относительно массы вещества исходной породы фронтальной зоны в стандартном геометрическом объеме 10000 Å³.

Note. 1) Coefficients of distribution of the elements in metasomatites relatively to the moderately alkaline dolerite frontal zone; 2) S is the sulphide sulphur, C is the carbon oxidized; 3) Δ is the specific weight of the removed (added >1, carried out <1) substance in per cent in relation to the weight of the initial rocks substance of the frontal zone in standard geometric measurement 10000 Å³.

Таблица 5. Химические составы послегранитных дорудных даек оливинсодержащих нормально щелочных пикродолеритов, долеритов, лейкодолеритов, оливинсодержащих умеренно щелочных пикродолеритов, долеритов мезотермальных месторождений золота Южной Сибири

Table 5. Chemical compositions of the after-granitic till-ore olivine-containing normal alkaline picrodolerites, dolerites, leucodolerites, olivine-containing moderately alkaline picrodolerites, dolerites of the gold-ore mesothermal deposits of South Siberia

Содержание, мас. %/Content, wt. %														
SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S сульфид.	CO ₂	CaO	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	ППП	Σ
Берикульское месторождение/Bericulskoe deposit														
44,24	17,89	1,44	3,09	0,25	0,52	9,53	6,75	8,15	3,76	1,50	0,15	0,34	1,28	98,89
45,19	17,89	1,05	3,35	0,08	0,45	10,12	5,08	7,83	3,53	1,51	0,19	0,44	3,40	99,91
46,24	14,24	0,55	2,35	0,15	0,61	10,16	10,31	6,82	2,24	1,05	0,14	0,23	4,08	99,17
46,81	17,78	1,73	3,50	0,15	0,63	9,26	4,04	9,65	1,81	1,33	0,14	0,26	2,18	99,47
47,01	17,41	1,74	3,45	0,11	0,49	7,75	5,57	9,58	2,07	1,43	0,15	0,33	2,12	99,21
47,52	17,63	2,05	3,33	0,07	0,41	8,98	4,67	8,26	2,92	1,43	0,17	0,27	2,24	99,95
47,65	20,44	1,05	3,00	0,06	0,17	9,41	5,77	7,81	2,03	1,02	0,10	0,23	1,69	100,43
47,67	14,52	1,30	3,05	0,06	0,67	9,96	9,75	6,67	2,30	0,78	0,11	0,20	2,41	99,45
47,93	19,01	0,95	4,68	0,12	0,50	9,41	2,98	5,68	3,90	0,79	0,21	0,32	4,00	100,46
48,01	16,14	1,30	3,05	0,12	0,50	9,69	7,76	6,82	1,94	0,92	0,11	0,22	2,74	99,32
48,15	19,01	0,90	4,00	0,05	0,38	9,69	2,98	5,96	3,29	0,81	0,17	0,36	4,01	99,76
49,12	19,34	1,00	3,60	0,04	0,49	7,34	5,26	6,79	2,21	1,19	0,14	0,38	3,18	100,08
50,75	18,05	2,19	3,42	0,12	0,22	8,42	4,04	7,55	1,93	1,01	0,19	0,24	2,05	100,09
50,95	16,14	1,65	3,48	0,21	0,50	9,48	5,97	7,38	0,82	0,99	0,10	0,22	2,26	100,15
51,24	17,39	1,75	3,34	0,14	0,00	8,63	4,60	6,10	2,35	0,99	0,10	0,22	2,27	99,12
51,96	18,11	1,55	3,40	0,16	0,00	8,30	3,98	7,10	2,22	1,02	0,09	0,22	1,81	99,92
53,08	17,75	1,55	3,37	0,04	0,39	9,48	3,78	5,68	2,71	0,91	0,20	0,26	1,60	100,80
53,29	21,45	1,60	3,30	0,09	0,53	7,04	2,23	4,85	1,80	0,79	0,14	0,34	2,08	99,53
Западное месторождение/Zapadnoe deposit														
40,78	13,53	0,07	1,83	0,15	0,18	11,8	4,96	10,9	7,93	2,19	0,48	1,68	3,11	99,59
41,69	14,34	0,16	2,46	0,00	0,18	10,7	5,46	13,4	5,60	2,32	0,48	1,14	2,59	100,52
44,59	15,78	0,83	2,86	0,20	0,23	8,16	6,07	8,37	7,15	1,97	0,29	0,58	2,71	99,79
44,70	15,60	0,73	3,16	0,13	0,27	8,02	6,37	9,18	5,77	1,86	0,22	0,51	2,80	99,32
44,71	14,88	1,75	2,64	0,03	0,40	7,57	5,80	6,54	8,39	1,55	0,20	0,49	4,07	99,02
44,78	15,78	0,19	3,36	0,12	0,32	8,02	6,27	10,1	4,49	1,86	0,22	0,55	3,43	99,49
Богодиканское месторождение/Bogodikanskoe deposit														
46,82	13,27	1,55	2,50	0,22	0,05	7,57	4,84	10,2	6,21	2,43	0,33	0,60	2,47	99,06
46,92	13,09	0,74	2,84	0,18	0,18	7,99	4,23	10,8	6,20	2,53	0,36	0,60	2,51	99,17
46,95	13,45	0,57	2,72	0,18	0,00	8,55	4,23	10,4	6,36	2,43	0,34	0,40	2,50	99,08
46,98	13,45	0,64	2,65	0,15	0,05	8,27	4,64	10,5	6,62	2,70	0,27	0,64	2,29	99,85
47,03	13,63	1,11	2,80	0,23	0,00	6,59	4,74	11,1	5,88	2,53	0,30	0,64	2,61	99,19
47,06	13,27	1,25	2,50	0,18	0,00	8,27	4,44	11,5	5,03	2,43	0,29	0,64	2,41	99,27
47,17	13,09	1,33	2,96	0,23	0,00	7,71	4,64	10,9	5,87	2,30	0,37	0,62	2,42	99,61
47,22	13,45	0,61	2,72	0,24	0,05	8,55	4,64	10,1	7,09	2,53	0,38	0,60	2,36	100,54
47,27	13,27	1,33	2,40	0,23	0,00	7,99	4,54	10,6	6,21	2,53	0,30	0,60	2,29	99,56
47,28	13,63	1,50	2,50	0,22	0,27	8,27	4,44	10,6	6,21	2,43	0,40	0,31	1,85	99,91
47,28	13,09	1,13	2,94	0,23	0,27	7,43	4,84	10,9	5,72	2,60	0,30	0,60	2,08	99,41
47,32	13,27	1,33	2,60	0,24	0,27	7,43	4,84	11,1	5,56	2,70	0,29	0,66	2,73	100,34
47,42	13,62	0,88	2,72	0,22	0,09	7,71	4,64	10,6	6,20	2,43	0,33	0,60	2,24	99,70
47,66	13,99	1,50	2,60	0,23	0,54	8,27	4,84	11,2	4,76	2,46	0,31	0,55	0,83	99,74
Урянское месторождение/Uryakhske deposit														
47,09	18,31	1,57	2,89	0,11	0,70	8,34	5,61	6,11	4,56	2,10	0,17	0,24	1,78	99,58

Примечание. Нормативные содержания петрогенных компонентов [79]: 1) основные вулканические и плутонические породы нормально щелочные: 45 % ≤ SiO₂ ≤ 52 %, 0,5 % ≤ (Na₂O + K₂O) ≤ 5 %; 2) основные вулканические и плутонические породы умеренно щелочные: 45 % ≤ SiO₂ ≤ 52 %, 3 % ≤ (Na₂O + K₂O) ≤ 7,5 %.

Note. Normative contents: 1) basic volcanic and plutonic normal alkaline rocks: 45 % ≤ SiO₂ ≤ 52 %, 0,5 % ≤ (Na₂O + K₂O) ≤ 5 %; 2) basic volcanic and plutonic moderately alkaline rocks: 45 % ≤ SiO₂ ≤ 52 %, 3 % ≤ (K₂O + Na₂O) ≤ 7,5 % [79].

Минералого-петрохимические составы аподолеритовых метасоматитов внутрирудных даек мезотермальных месторождений золота Южной Сибири

Внутрирудный возраст даек долеритов доказывается: 1) структурными соотношениями даек с рудами – пересечениями ими ранних рудно-минеральных комплексов и пересечениями их более поздними рудно-минеральными комплексами (рис. 4); 2) признаками теплового воздействия поздних образований на ранние – разгерметизацией вакуолей в кварце в экзоконтактах пересекающих кварц даек с постепенным ослаблением и исчезновением эффекта по мере удаления от них; 3) гидротермальными изменениями даек в экзоконтактах поздних пересекающих их сульфидно-кварцевых прожилков и жил.

В объеме до 100 % внутрирудные дайки долеритов преобразованы в высокотемпературные метасоматиты, в составе которых ранние биотит (до 50...70...100 об. %, табл. 6) и магнезиально-железистая обыкновенная роговая обманка (до 5...10 об.

%, табл. 7) частично замещены более поздними в разных сочетаниях актинолитом, тремолитом, Mg-Fe хлоритами (рипидолитом, прохлоритом, пеннинном, брунсвигитом), цоизитом, клиноцоизитом, эпидотом, антигоритом, монтмориллонитом, тальком, кварцем, альбитом, серицитом, кальцитом, доломитом, доломитом-анкеритом, анкеритом, сидеритом, лейкоксеном, рутилом, апатитом, целистином, баритоцелестином, магнетитом, пиритом. Породы унаследовали от исходных долеритов черный цвет, массивную текстуру, эпизодически – реликты сильно замещенных минералов долеритов – лабрадора-андезина, авгита, ортоклаза. Лепидобластовая, гранолепидобластовая, пойкилобластовая, порфиробластовая структуры метасоматитов по размерам кристаллов сопоставимы со структурами исходных долеритов. Полнопроявленные аподолеритовые метасоматиты былых внутрирудных даек залегают среди в разной степени измененных и не измененных пород – околорудных березитов, гранитоидов, черных сланцев и других.

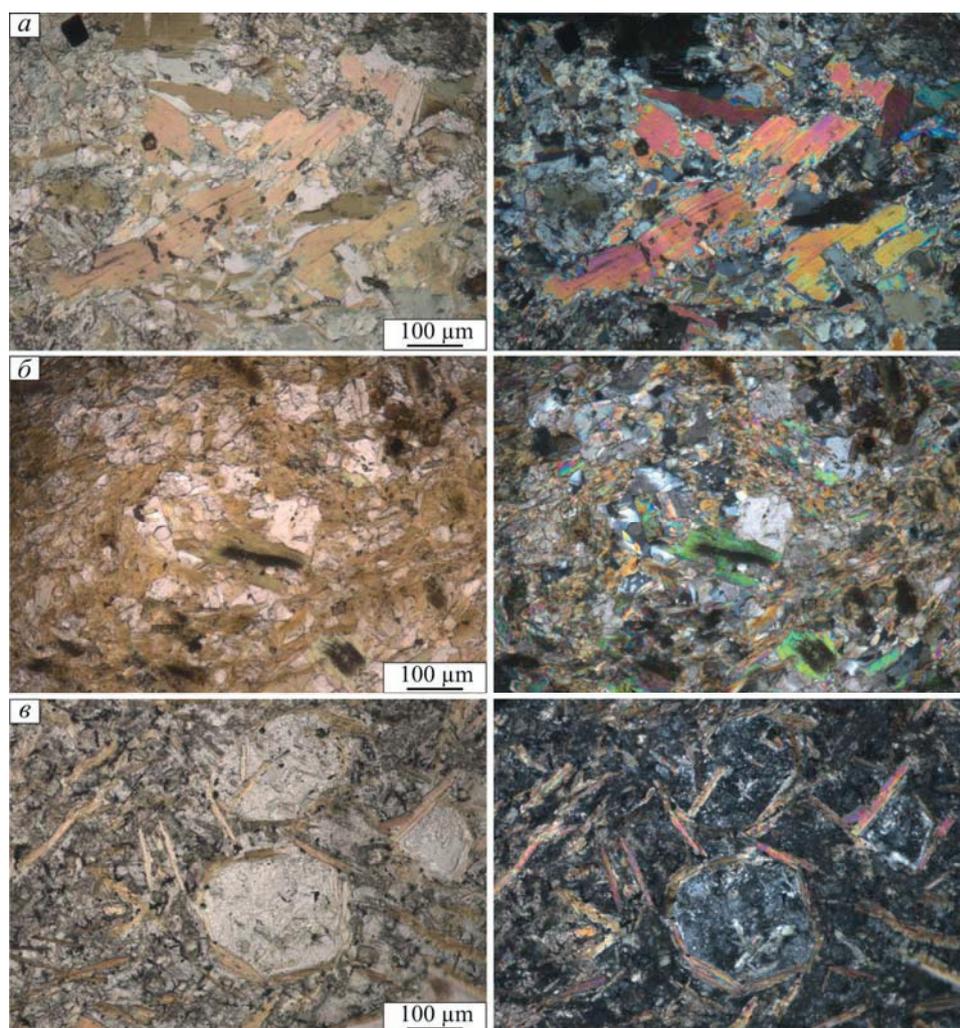


Рис. 5. Биотитовые метасоматиты, образованные во внутрирудных дайках долеритов

Fig. 5. Biotite metasomatites formed in inside-ore dolerite dikes

Таблица 6. Химические составы биотита аподолеритовых метасоматитов внутрирудных даек мезотермальных месторождений золота Южной Сибири

Table 6. Chemical compositions of the biotite of the inside-ore dikes apodolerite metasomatites in golden mesothermal deposits of South Siberia

Содержание, мас. %/Content, wt. %											
SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	FeO	TiO ₂	MnO	BaO	Cl	Σ
37,68	15,43	9,39	0,24	0,98	14,30	16,64	1,55	0,23	0,16		96,60
38,03	16,02	9,67	–	0,73	14,84	14,20	2,16	–	1,51	0,18	97,34
37,64	15,90	9,43	–	0,56	14,56	14,83	2,21	–	0,84	0,12	96,09

Примечание. В FeO дано валовое содержание железа.
 Note. FeO – is Fe gross content.

Формирование перечисленных структур сопровождается массовым явлением – замещением исходных и ранних минералов этапа метасоматизма (роговой обманки, биотита, актинолита) поздними, что выражается в коррозионных, «размытых» контурах минеральных зерен и агрегатов, постепенных переходах между кристаллами разных минералов, пятнообразных выделениях кристаллов с нечеткими границами.

Таблица 7. Химические составы магнезиально-железистой обыкновенной роговой обманки аподолеритовых метасоматитов внутрирудных даек мезотермальных месторождений золота Южной Сибири

Table 7. Chemical compositions of the amphibole hornblende of the inside-ore dikes apodolerite metasomatites in golden mesothermal deposits of South Siberia

Содержание, мас. %/Content, wt. %									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	Σ
44,54	10,05	9,18	13,91	13,68	2,49	0,37	1,28	2,92	98,42
47,74	8,67	11,53	14,83	12,33	0,66	–	0,27	1,96	97,99
49,47	6,66	8,77	15,28	13,03	1,40	0,53	0,33	2,57	98,04

Примечание. В FeO дано валовое содержание железа.
 Note. FeO – is Fe gross content.

Наблюдаемые факты пересечения относительно высокотемпературным биотитом агрегатов более низкотемпературных хлоритов, альбита, талька и других минералов, в том числе заполняющих бывшие порфиновые выделения авгита долеритов, факт образования «венчиков» пластинок биотита без признаков их замещения вокруг бывших порфиновых выделений (рис. 5) доказывают принадлежность этого биотита к его поздней генерации, образованной, очевидно, вследствие поступления свежей высокотемпературной порции раствора после образования ассоциации низкотемпературных минералов.

Согласно результатам балансовых расчетов миграции в аподолеритовых метасоматитах петрогенных компонентов (табл. 8), интегральный показатель интенсивности метасоматических преобразований долеритов внутрирудных даек – удельная масса перемещенного (привнесенного и вынесен-

ного) вещества – достигает 33 мас. % (проба К-569). Из пород всех опробованных даек устойчиво удаляются Si (до 36,5 мас. %, проба К-569), Na (до 99 мас. %, проба К-569 и другие). При величине $\Delta \geq 16$ мас. % в породы устойчиво поступают CO₂ (до 4107 мас. %, проба К-468) и феофильные элементы Mg (до 126 мас. %, проба К-444), Ti (до 322 мас. %, проба К-364), P (до 400 мас. %, проба К-569). При наивысшей интенсивности изменений пород ($\Delta = 20 \dots 33$ мас. %) единственный носитель в них K биотит полностью растворяется и калий, как и натрий, удаляется с растворами.

Обсуждение и выводы

В упомянутых и многих других мезотермальных месторождениях золота, как это следует из приведенных материалов, среди послегранитных дорудных, в том числе сопровождаемых золоторудными кварцевыми жилами, внутрирудных, послерудных даек долеритов не обнаружены минглинг-дайки, образуемые в результате кристаллизации нерастворимых на ионно-молекулярных уровнях механически смешанных, а потому контрастных, обладающих разной вязкостью гранитных и базитовых расплавов, и известные в некоторых районах вне золоторудных мезотермальных месторождений [80]. Отсутствие в месторождениях, в том числе локализованных в гранитах, с которыми генетически связывают оруденение, признаков засорения поднимающихся базитовых расплавов гранитными или гранитных базитовыми («гибридных» даек) подчеркивается также нормативными минералого-химическими составами ранних послегранитных дорудных и внутрирудных даек долеритов, умеренно щелочных долеритов, лейкодолеритов – производных слабой дифференциации базитовых расплавов. Это означает, что уже ранние порции базитовых расплавов, поднимающихся из мантии в области рудообразования на верхние горизонты земной коры, на своем пути не встречали остаточные гранитные расплавы даже в низах бывших магматических камер, очевидно, по причине отсутствия гранитных расплавов вследствие полной их кристаллизации во всем объеме магматических очагов до активизации базитовых очагов в мантии.

Редкий пример возможного смешения внедряющихся базитовых расплавов с остатками гранитных представляют дайки «гибридных» диоритовых порфиритов Голготайского и Карийского золоторудных месторождений Восточного Забайкалья [64]. Этот пример не исключает генерацию золотоносных (металлоносных) растворов в базитовых расплавах при образовании мезотермальных месторождений золота, цветных металлов, в которых «гибридные» дайки, минглинг-дайки не обнаружены. Вместе с тем этот пример не исключает общую закономерность – внедрение базитовых расплавов в области рудообразования после, в том числе вслед (с минимальным возрастным интервалом) кристаллизации гранитных расплавов, вклю-

Таблица 8. Химические составы умеренно щелочных долеритов, аподолеритовых метасоматитов внутрирудных даек и баланс (привнос, вынос-) петрогенных элементов в аподайковых метасоматитах Кедровского месторождения золота

Table 8. Chemical compositions of the moderately alkaline dolerites, apodolerite metasomatites inside-ore dikes and balance (addition, carry out-) of petrogenous elements into apodolerite metasomatites of Kedrovskoye mesothermal gold deposit

Номера проб Samples number	Содержание окислов в мас. % (первая строка). Величина привноса, выноса (-) атомов элементов в стандартном геометрическом объеме 10000 Å ³ в % к числу их атомов в стандартном геометрическом объеме исходной породы (вторая строка) Content of the components, wt. % (first line). Size of the elements atoms addition or subtraction (-) in standard geometric volume 10000 Å ³ in % to the number of their atoms in standard geometric volume of the initial rock (second line)															
	SiO ₂ Si	Al ₂ O ₃ Al	K ₂ O K	Na ₂ O Na	CaO Ca	MgO Mg	FeO Fe ²⁺	Fe ₂ O ₃ Fe ³⁺	TiO ₂ Ti	P ₂ O ₅ P	MnO Mn	CO ₂ C	S S	H ₂ O H	O O	Σ (Δ)
*	49,72	14,94	0,90	3,05	8,47	7,43	8,03	2,86	1,41	0,35	0,19	0,35	0,13	1,81	-	99,64
K-9	43,91 -8,3	13,81 -4,0	1,38 59	3,30 12	7,74 -5,2	9,61 35	8,18 8,7	4,92 78	2,25 66	0,64 90	0,25 37	0,68 102	0,17 36	2,29 31	1,6	99,13 (8)
K-297	44,09 -6,4	13,99 -1,1	1,00 17	2,28 -21	7,82 -2,3	10,4 48	8,36 10	3,99 47	1,78 33	0,34 2,5	0,21 17	0,51 54	0,13 5,7	3,91 128	5,4	98,81 (9)
Ш-68	43,68 -12,4	13,70 -8,6	0,59 -34	3,28 7,2	7,43 -13	5,54 -26	8,43 4,5	3,33 16	2,30 63	0,59 68	0,24 26	7,84 1291	0,11 -16	1,77 161	3,5	98,83 (10)
Ш-70	43,68 -12,7	13,70 -8,9	0,52 -43	2,72 -12	7,01 -18	6,05 -19	8,24 2,3	3,24 13	2,12 49	0,41 16	0,25 31	5,35 1420	0,18 37	4,90 170	3,6	98,37 (10)
Ш-83	44,03 -9,2	14,75 1,1	1,22 39	1,80 -40	9,11 9,9	7,46 3,1	6,47 -18	3,91 40	1,10 -20	0,11 -68	0,14 -25	3,41 900	0,32 152	4,86 175	5,7	98,69 (10)
Ш-67	44,03 -13	13,95 -8,3	0,90 -1,9	2,72 -12	6,31 -27	6,75 -10	7,78 -4,5	4,46 55	2,22 40	0,50 -6,9	0,18 -6,9	4,60 1192	0,15 13	5,14 178	3,4	99,69 (11)
Ш-69	47,38 -4,7	12,65 -15,3	1,00 11	2,64 -14	7,85 -7,6	4,94 -33	6,19 -23	3,92 37	1,83 30	0,41 17	0,24 26	6,01 1620	0,18 38	4,07 124	5,9	99,31 (12)
Ш-78	43,38 -13	13,55 -9,6	0,85 -5,7	2,54 -17	7,43 -13	5,54 -26	7,78 -3,4	3,96 38	2,29 62	0,59 68	0,31 62	5,35 1424	0,18 38	5,17 185	4,4	98,92 (12)
K-487	41,90 -19	13,99 -10	0,16 -83	3,72 17	8,48 -4,1	7,03 -9	7,05 -16	2,95 -1,2	1,85 26	0,24 -34	0,20 0,7	6,59 1704	0,00 -100	5,68 201	2,5	99,84 (12)
K-611	39,80 -18	14,50 -0,5	1,27 45	2,18 -27	8,41 1,7	8,27 14	7,05 -10	3,67 32	2,00 45	0,26 -24	0,26 40	7,28 2033	0,14 10	3,34 90	5,4	98,43 (12)
K-423	40,35 -16,6	11,83 -18,8	2,76 214	2,08 -30	9,50 15	13,0 80	7,65 -2,3	3,80 36	1,95 42	1,26 269	0,23 25	1,99 483	0,11 -13	4,04 130	3,0	100,55 (16)
K-481	40,30 -15,3	11,65 -18,4	3,42 298	1,00 -66	9,92 23	12,6 78	8,10 5,6	3,38 19	1,83 36	1,66 395	0,27 49	2,40 620	0,03 -76	2,8162	2,9	99,37 (18)
K-588	40,40 -14,2	11,50 -18,7	2,90 241	1,09 -62	11,5 44	12,2 74	6,90 -9,0	4,33 60	2,44 83	1,04 213	0,23 28	2,67 708	0,26 111	1,69 -1,4	2,3	99,15 (19)
K-496	38,26 -19,8	13,54 -5,5	5,30 513	0,77 -74	9,50 17	12,8 80	7,19 -6,8	3,51 28	2,18 61	1,44 329	0,25 37	3,44 926	0,12 -3,8	1,70 -2,1	1,7	100,00 (19)
K-501	38,78 -17,9	11,47 -19,2	3,30 286	0,55 -81	10,1 26	12,9 83	9,25 21	2,50 -7,9	2,58 93	1,53 360	0,23 28	2,05 516	0,16 30	3,52 106	2,9	98,92 (20)
K-489	39,22 -22	12,73 -15,7	0,09 -90	0,64 -79	11,2 31	9,04 20	9,52 18	1,40 -52	3,35 135	1,60 352	0,41 110	6,38 1704	0,05 -62	5,17 182	5,0	100,80 (20)
K-444	39,21 -17,6	10,40 -27,2	2,70 214	0,49 -83	10,9 34	16,0 126	7,70 0,6	3,42 25	1,80 34	1,44 331	0,37 104	2,19 557	0,08 -36	3,29 90	3,5	99,99 (21)
K-493	40,07 -17,3	9,23 -36,6	2,54 191	0,25 -92	11,2 36	16,0 121	8,15 4,5	3,10 11	2,20 60	0,90 165	0,23 24	2,85 734	0,07 -45	3,41 93	2,3	100,20 (21)
K-497	38,76 -16,8	10,75 -23,2	4,26 405	0,34 -88	10,1 27	13,3 91	8,79 17	2,69 0,4	2,75 108	1,36 315	0,21 18	1,83 457	0,16 31	3,40 100	3,3	98,70 (21)
K-363	37,25 -23,5	10,44 -28,6	1,27 44,8	1,36 -54	8,83 6,4	8,90 23	12,3 56,4	4,05 44,6	4,65 236	0,60 74,9	0,24 28,9	6,34 1752	0,00 -100	3,56 102	2,6	99,79 (21)
K-429	41,00 -13,8	8,79 -38,4	1,70 99	0,22 -92	10,5 30	15,4 117	8,75 14	3,22 18	2,10 55	0,88 163	0,27 49	2,87 760	0,09 -27	4,50 161	6,2	100,29 (22)
K-498	39,48 -14,7	10,76 -22,6	3,40 306	0,23 -92	10,1 28	14,1 104	9,07 21	2,38 -11	2,48 89	1,29 296	0,23 30	1,60 391	0,22 82	3,80 126	5,2	99,14 (22)
K-491	36,44 -24,7	11,12 -23,6	5,18 490	1,09 -63	11,7 42	12,8 77	6,96 -11	3,47 24	2,05 50	1,65 384	0,21 14	6,24 1730	0,18 42	1,07 -39	0,3	100,16 (23)
K-495	37,83 -22	9,14 -37,2	5,06 475	0,27 -91	11,6 41	14,0 94	7,79 -0,6	3,98 43	2,55 86	1,37 303	0,29 57	4,88 1332	0,14 11	1,30 -26	-0,6	100,20 (24)
K-562	38,0 -17,1	10,80 -21,6	3,16 281	0,39 -86	11,2 43,6	15,3 123	7,49 1,1	3,88 47,2	2,10 61,7	1,08 234	0,29 65,6	2,89 797	0,27 125	2,54 52	5,5	99,39 (24)
K-468	35,30 -30,6	9,86 -35,5	0,96 4,7	0,03 -99	12,0 38	12,9 70	8,16 -0,6	1,31 -55	1,97 37	1,19 232	0,40 106	11,9 3225	0,16 21	4,00 116	4,2	100,14 (25)

Окончание табл. 8

Table 8

Номера проб Samples number	Содержание окислов в мас. % (первая строка). Величина привноса, выноса (-) атомов элементов в стандартном геометрическом объеме 10000 Å ³ в % к числу их атомов в стандартном геометрическом объеме исходной породы (вторая строка)																
	Content of the components, wt. % (first line). Size of the elements atoms addition or subtraction (-) in standard geometric volume 10000 Å ³ in % to the number of their atoms in standard geometric volume of the initial rock (second line)																
	SiO ₂ Si	Al ₂ O ₃ Al	K ₂ O K	Na ₂ O Na	CaO Ca	MgO Mg	FeO Fe ²⁺	Fe ₂ O ₃ Fe ³⁺	TiO ₂ Ti	P ₂ O ₅ P	MnO Mn	CO ₂ C	S	H ₂ O H	O	Σ (Δ)	
K-364	35,51 -26,1	10,50 -27,2	0,06 -93	0,75 -75	8,08 -1,2	8,95 25	12,3 58,7	2,27 -18	4,38 322	1,04 306	0,23 25,3	11,0 3158	0,18 43,4	4,44 154	9,3	99,69 (26)	
K-7	37,09 -22,6	8,96 -37,7	0,04 -95	0,93 -68	12,2 49	15,7 120	9,93 29	1,53 -44	1,61 19	1,28 280	0,29 59	3,66 989	0,03 -76	5,90 239	5,7	99,15 (26)	
K-469	36,82 -25,6	10,94 -26,5	0,04 -96	0,30 -90	6,90 -18	9,26 25	17,0 113	0,66 -77	3,62 158	0,55 58	0,26 38	9,32 2579	0,02 -85	4,56 154	4,8	100,25 (28)	
K-486	33,80 -30,6	8,16 -44	2,72 209	0,02 -99	12,0 45	12,9 78	6,87 -12	2,27 -19	1,95 41	1,17 241	0,33 77	14,4 4107	0,13 2,2	1,98 12	5,9	98,70 (29)	
K-569	30,48 -36,5	9,86 -31,6	0,06 -93	0,03 -99	10,6 29,7	11,8 64,5	14,1 81,8	0,96 -65,3	1,46 7,1	1,69 400	0,28 52,4	13,0 3738	0,00 -100	3,87 120	6,6	98,19 (33)	

Примечание. 1) * – среднее содержание петрогенных компонентов в дайках не измененных умеренно щелочных долеритов; 2) S – сера сульфидная; 3) Δ – удельная масса перемещенного (привнесенного и вынесенного) вещества в процентах к массе вещества исходной породы фронтальной зоны в стандартном геометрическом объеме 10000 Å³.

Note. 1) * is average content of petrogenous components in dikes of non-altered moderately alkaline dolerites; 2) S is the sulphide sulphur; 3) Δ is the specific weight of the removed (added and carry out) substance in per cents in relation to the weight of the initial rocks substance in standard geometric measurement 10000 Å³.

чая остаточные, – ранних производных рудопродуцирующих на позднем базальтоидном этапе становления антидромных гранит-диорит-долеритовых магматических комплексов, и, следовательно, образование поздних базитовых пород – даек долеритов в их составе [72, 73].

В свою очередь, факты ранней инъекции золотосодержащих (металлоносных) растворов в области рудообразования после кристаллизации ранней порции послегранитных базитовых расплавов, образования остывавших до потери флюидопроводящей способности дорудных даек долеритов и сопровождающего инъекцию образования в них околорудных метасоматических колонок пропилит-березитового минералогического петрохимического профиля составляют начальную доказательную базу представления о генерации рудообразующих растворов не в гранитных, а в базитовых расплавах – растворы не могли быть генерированы в уже не существовавших остаточных гранитных расплавах.

После смены петрохимического профиля магматизма с гранитного на базитовый в процессе становления антидромных магматических комплексов функционирование магматогенно-флюидных рудообразующих систем осуществляется в условиях высокой активности базитовых магматических очагов мантии – многоактное внедрение в образующиеся месторождения умеренно щелочных базитовых расплавов [72] чередуется с инъекциями золотосодержащих (металлоносных) растворов подобно тому, как это происходит в областях современной вулканической деятельности, – извержения расплавов чередуются с выделением вулканических газов – надкритических металлоносных растворов [81, 82].

Преобразование в мезотермальных месторождениях золота внутрирудных даек долеритов в высокотемпературные роговообманково-биотитовые метасоматиты (рис. 5) среди слабо измененных пород (гранитоидов, углеродистых черных сланцев и других) есть следствие их флюидопроводящей в горячем состоянии способности – аккумуляции в дайках наряду с разломами поднимающихся горячих металлоносных растворов и взаимодействия последних с долеритами. Минеральный состав аподолеритовых метасоматитов свидетельствует о минимальном перерыве между внедрением расплавов и инъекцией растворов – еще горячие дайки повышают температуру растворов в начале фильтрации последних в дайках, но постепенное снижение температуры – охлаждение метасоматитов и растворов в них – сопровождается частичным замещением ранних метасоматических роговой обманки и биотита сравнительно низкотемпературными хлоритами, альбитом, карбонатами. Однако образование венчиков чешуек биотита вокруг тонкозернистых агрегатов упомянутых низкотемпературных минералов, заполняющих бывшие кристаллы магматического пироксена в порфириновых выделениях, представляет следствие нового возрастания температуры в системах порода-раствор, обусловленного, очевидно, подтоком свежих более высокотемпературных его порций.

Результатами балансовых расчетов миграции петрогенных компонентов при образовании аподолеритовых и околорудных (околожилных) в разных породах метасоматических колонок в мезотермальных месторождениях золота доказываются однородный химический состав фильтрующихся вверх в дайках и соседних разломах растворов –

те и другие метасоматиты образованы в процессе калиево-сернисто-углекислотного метасоматизма, в тех и других метасоматитах образованы контрастные аномалии фемофильных (P, Ti и др.) металлов в ближнем обрамлении рудоконтролирующих и раствороподводящих глубинных разломов. Фиксация в аподолеритовых метасоматитах поступающего с растворами извне калия в высокотемпературном биотите, в отличие от фиксации его в околорудных метасоматитах в относительно низкотемпературном сериците, обусловлена приобретением фильтрующимися в дайках растворами высокой температуры даек на начальных этапах их остывания.

Результаты изучения магматических и метасоматических пород в мезотермальных месторождениях золота обеспечили возможность проследить пути подъема обогащенных соединениями фемофильных элементов горячих металлоносных растворов от базитовых очагов их генерации в мантии по оставленным в горячих внутрирудных дайках базитов минералого-петрохимическим следам в образуемые этими растворами месторождения, околорудные метасоматиты в которых унаследовали петрохимические черты (K, S, CO₂) фильтровавшихся в дайках растворов и контрастные аномалии транспортируемых (доставленных) ими фемофильных элементов (Mg, Ca, Fe, Ti, P, Mn). Эти результаты в сочетании с данными об изотопных составах серы сульфидов и углерода карбонатов руд, отвечающих мантийным меткам [58, 73], составляют основу представления о парагенетической связи мезотермальных месторождений металла с плутонами, массивами гранитоидов – ранними производными антидромных гранит-диорит-долеритовых магматических комплексов [72, 73], и генетической связи с малыми телами – дайками базитов – поздними производными комплексов, приобретающих вследствие этого статус флюидно-рудно-магматических. Очевидно, не требуется доказывать, вопреки цитированному выше утверждению Х.М. Абдуллаева, то, что малые размеры трещинных тел – даек базитов, не коррелируют и не могут коррелировать с объемами очагов, генерирующих металлоносные растворы базитовых расплавов в мантии, которым природа не запрещает быть сопоставимыми с объемами гранитных расплавов в коре и также способными генерировать металлоносные растворы в количествах, необходимых для образования промышленных месторождений.

Способность металлов накапливаться в заполненных базитовыми расплавами магматических камерах в процессах и посредством кристаллизационной дифференциации или ликвации доказывает образованием промышленных, в том числе уникальных, магматических месторождений хрома-платиноидов, железа-титана-фосфора-ванадия, меди-никеля-кобальта-золота-платиноидов. Способность перечисленных и других металлов покидать магматические камеры и двигаться вверх в

области мезотермального рудообразования доказывается выделением из маловодных базитовых расплавов достигающих атмосферы в вулканах с мантийным питанием вулканических газов – надкритических металлоносных растворов, выносящих в течение геологического времени металлы, в том числе золото, в количествах, сопоставимых с запасами их в промышленных мезотермальных месторождениях [81, 82].

Приведенные материалы, извлеченные из мезотермальных месторождений золота, образуют согласованный ансамбль фактов и дополняют характеризующие пространственно-временные соотношения мезотермальных руд олова, вольфрама, других цветных металлов с дайками базитов данные, опубликованные более полувека назад, и подчеркивают справедливость цитированных выше выводов Ф.И. Вольфсона и В.Н. Котляра о необходимости изучения сопровождающих массивы гранитоидов дайковых пород и целесообразность поиска других описанных выше доказательств генетической связи с базитовыми составляющими антидромных магматических комплексов мезотермальных месторождений перечисленных металлов.

Заключение

При объективно обусловленном индуктивном способе познания процессов рудообразования прогресс в их реконструкции зависит от выбора и возможностей накопления достоверных данных.

Поучительна, а потому представляет психологический и методологический интерес для решения обсуждаемой проблемы рудной геологии история формирования и поддержания до сих пор остающегося высоким уровня популярности в ученом сообществе представления о генерации металлоносных образующих мезотермальные месторождения золота, цветных металлов растворов в коровых очагах гранитных расплавов. История началась в середине прошлого столетия после того, как стала очевидной несостоятельность считавшегося ранее корректным и важнейшим геохимического критерия обусловленности рудообразования гранитным магматизмом.

После смены парадигмы гранитогенного сценария популярность и противостояние его с базальтогенным сценарием рудообразования продолжились, при том, что были известны упомянутые опубликованные в пятидесятых годах прошлого столетия факты, которые не вписываются в доказательную базу гранитогенного сценария. В связи с этим возникают психологические вопросы.

Почему не воспринято массами после опубликования в Известиях АН СССР цитированных выше материалов *прямое указание природы* на образование мезотермальных месторождений цветных металлов после кристаллизации гранитных расплавов, включая создавших сопровождающие плутоны, массивы гранитоидов поздние дайки кислых пород, и на функционирование магматоген-

но-гидротермальных рудообразующих систем одновременно с активностью базитовых очагов мантии? Почему в течение последующих десятилетий и до сего времени, несмотря на подтверждение привлекаемыми из месторождений новыми данными упомянутых материалов и вопреки опиравшимся на факты рекомендациям несомненных знатоков устройства месторождений Ф.И. Вольфсона и В.Н. Котляра, следующая всего лишь из предположений руководящая идея Л.В. Таусона о потенциальной рудоносности и рудной продуктивности гранитных расплавов и, как следствие, о перспективности и необходимости реконструкции условий функционирования в магматических камерах гранитных расплавов с целью оценки их способности генерировать металлоносные растворы в количествах, достаточных для образования промышленных месторождений, приобрела и сохраняет популярность в сознании масс еще и при том, что получаемые результаты – выводы – остаются проблематичными? Ответ очевиден.

Психологические вопросы отражают негативное влияние человеческого фактора на выбор в середине прошлого столетия методологии – направления и содержания дальнейших исследований, вероятно, усиленного авторитетом автора руководящей идеи Л.В. Таусона. Была предпринята поддержанная большей частью ученого сообщества попытка заменить рациональный в этих условиях, более того, неизбежный индуктивный подход к исследованию проблемы дедуктивным. Человеческий фактор в данном случае, как и в случае его негативного влияния на разработку Д.С. Коржинским теории метасоматической зональности [76], заключается в приоритете гипотетических представлений человека над фактами, наблюдаемыми в природе, при том, что эти факты, как отмечалось, совершенно очевидно не вписываются в представления. О послегранитных дайках базитов второго этапа разделяющие гранитогенную гипотезу представители ученого сообщества или не знают, или вслед за Х.М. Абдуллаевым их не замечают по причине малых размеров. Вероятно то и другое. В итоге неизбежны имеющие место быть бесконечные дискуссии.

В частности, вопреки очевидной необходимости детально исследовать сопровождающие плутоны, массивы гранитоидов дайковые ассоциации на предмет выяснения возможных причинно-следственных связей с ними оруденения, был выбран не лучший вариант в пользу гранитогенной гипотезы. В результате этого выбора дайковые ассоциации фактически исключены из процесса рудообразования, тем самым, – из процесса познания.

Между тем, последовательностью и содержанием создающих месторождения, то есть реальных, геологических процессов (п. 3) доказывается обратное – ассоциации слабо дифференцированных сопровождающих массивы гранитоидов, зрелые очагово-купольные ультраметаморфические постройки базитовых даек служат носителями информации, обеспечивающей реконструкцию источников металлоносных растворов, путей их движения от источников в месторождения, петро-химические и геохимические доказательства генерации металлоносных растворов в очагах базитовой магмы.

В свою очередь, проблематичность результатов реализации исследований в соответствии с руководящей идеей Л.В. Таусона в течение последних десятилетий, которая могла быть прогнозируемой в начале пути, обусловлена отсутствием по вполне объективным причинам содержательных ответов на следующие ключевые методические вопросы.

С какой степенью достоверности анализируемые в процессе реконструкции условий функционирования гранитных расплавов в магматических камерах образцы гранитоидов представляют остаточные очаги гранитной магмы, сохраняющиеся, вероятно, в низах магматических камер в условиях более быстрого охлаждения расплавов в их верхах, при малой вероятности достижения эрозией глубоких (до многих километров от поверхности) уровней остаточных очагов – накопителей металлоносных растворов, сравнительно равномерном распределении золота и цветных металлов в плутонах, массивах гранитоидов [83], послужившем, как отмечалось, причиной отказа от представления о металлогенической специализации гранитоидов? С какой степенью достоверности могут быть оценены и оцениваются в каждом конкретном плутоне массы будто-то бы генерированных в гранитных расплавах металлоносных растворов и металлов в них, квалифицируемые как достаточные для образования промышленных месторождений при обычной пространственно-временной близости месторождений к плутонам, массивам гранитоидов, которая может быть и бывает следствием всего лишь парагенетической связи между ними?

Позитивные выводы, подтверждающие руководящую идею Л.В. Таусона, остаются мало обоснованными или недоказанными, в том числе по причине отсутствия, в отличие от базальтогенного сценария, связующих звеньев между остаточными гранитными расплавами и месторождениями, подобных внутрирудным дайкам-флюидопроводникам долеритов, аподолеритовым метасоматитам с их минералого-петрохимическим и геохимическим содержанием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линдгрэн В. Минеральные месторождения. Вып. 1. – М.: ОНТИ НКТП СССР, 1934. – 186 с.
2. Алабин Л.В., Калинин Ю.А. Металлогения золота Кузнецкого Алатау. – Новосибирск: Изд-во СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1999. – 237 с.
3. Thompson J.F.H., Newberry R.J. Gold deposits related to reduced granitic intrusions // Society of Economic Geologists, Reviews. – 2000. – V. 13. – P. 377–400.
4. Условия зарождения и эволюции гранитоидных золоторудно-магматических систем в мезозоидях Северо-Востока Азии / Г.Н. Гамянин, Н.А. Горячев, А.Г. Бахарев, П.П. Колесниченко, А.И. Зайцев, Е.Н. Диман, Н.В. Бердников. – Магадан: СВ КНИИ ДВО РАН, 2003. – 196 с.
5. Сидоров А.А., Волков А.В. О золоторудных месторождениях в гранитоидах // Доклады РАН. – 2000. – Т. 375. – № 6. – С. 806–811.
6. Petrochemical characteristics of gold-related granitoids in Southwestern New Brunswick, Canada / X.M. Yang, D.R. Lentz, G. Chi, K.G. Thome // Explorer Mining Geology. – 2004. – V. 31. – P. 34–47.
7. Yang X.M., Lentz D.R. Chemical composition of rock-forming minerals in gold-related granitoid intrusions, Southwestern New Brunswick, Canada: implications for crystallization conditions, volatile exsolution and fluorine-chlorine activity // Contribution Mineral Petroleum. – 2005. – V. 150. – P. 287–305.
8. Хомичев В.Л. Модель золотоносной габбро-диорит-гранодиоритовой формации // Петрология и рудообразование. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2005. – С. 58–70.
9. Ножкин А.Д., Борисенко А.С., Неволько П.А. Позднепротерозойский рифтогенный и внутриплитный магматизм, золотое и золото-урановое оруденение Енисейского кряжа // Современные проблемы геологии и разведки полезных ископаемых: Материалы Международной научной конференции. – Томск, 5–8 октября 2010. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – С. 266–274.
10. Золотоносные габбро-тоналит-гранодиорит-гранитные массивы Урала: возраст, геохимия, особенности магматической и рудной эволюции / Г.Б. Ферштатер, В.В. Холоднов, А.А. Кремнецкий, А.А. Краснова, Н.С. Бородин, Е.А. Зинькова, С.В. Прибавкин // Геология рудных месторождений. – 2010. – Т. 32. – № 1. – С. 65–84.
11. Гусев А.И., Гусев А.А. Шошонитовые гранитоиды: петрология, геохимия, флюидный режим, рудоносность. – М.: Изд-во РАЕ, 2011. – 125 с.
12. Рафаилович М.С., Мизерная М.А., Дьячков Б.А. Крупные месторождения золота в черносланцевых толщах: условия формирования, признаки сходства. – Алматы: КазИМС, 2011. – 272 с.
13. Эммонс У.Х. Введение в учение о рудных месторождениях. – М.: Л., 1925. – 206 с.
14. Степанов В.А. Зональность золото-кварцевого оруденения Центральной Колымы. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 70 с.
15. Горжевский Д.И., Козеренко В.Н. Связь эндогенного рудообразования с магматизмом и метаморфизмом. – М.: Недра, 1965. – 300 с.
16. Сердюк С.С. Золотоносные провинции Центральной Сибири: геология, минералогия, перспективы освоения. – Красноярск: КНИИГГиМС, 2004. – 478 с.
17. Абдуллаев Х.М. Дайки и оруденение. – М.: Госгеолтехиздат, 1957. – 232 с.
18. Миронов А.Г., Жмодик С.М. Золоторудные месторождения Урик-Китойской металлогенической зоны (Восточный Саян, Россия) // Геология рудных месторождений. – 1999. – Т. 41. – № 1. – С. 54–69.
19. Физико-химический анализ поведения золота в процессе дегазации магм / И.Д. Рябчиков, А.Е. Ефимов, В.М. Кулагин, Н.Л. Шилин // Проблемы геохимии эндогенных процессов. – Новосибирск: Наука, 1977. – С. 14–18.
20. Экспериментальное исследование поведения золота в магматическом и гидротермальном процессах (к проблеме источников вещества золоторудных месторождений) / Н.С. Жатнуев, А.Г. Миронов, Д.А. Дампилов, Н.Г. Бугаева // Золото Сибири: геология, геохимия, технология, экономика: Тез. докл. I Сибирского симпозиума с междунар. участием. – Красноярск, 1–3 декабря 1999. – Красноярск: КГАЦМиЗ, 1999. – С. 101–103.
21. Коваленко В.И., Кузьмин М.И., Коваль В.В. Геохимические типы мезозойских гранитоидов Монголии и их металлогения // Закономерности размещения полезных ископаемых. – М.: Наука, 1975. – Т. XI. – С. 329–334.
22. Шилин Н.Л., Кумеев С.С., Колосков А.В. Золото в калиевых полевых шпатах из интрузивных и метасоматических образований // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1988. – № 10. – С. 93–101.
23. Амузинский В.А. Геохимические особенности распределения золота в магматических породах Верхоянской антиклинальной зоны // Минералогия и геохимия производных гранитоидного магматизма. – Якутск: Институт геологии Якут. филиала СО АН СССР, 1981. – С. 89–98.
24. Дунин-Барковская Э.А., Смирнова С.К., Козлов В.В. Флюидный режим формирования важнейших продуктивных минеральных ассоциаций и парагенезисов золоторудных, редкометалльных и флюоритовых месторождений Узбекистана // Минералообразующие флюиды и рудогенез. – Ташкент, 1998. – С. 69–72.
25. Гамянин Г.Н. Минералого-геохимические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозоид. – М.: ГЕОС, 2001. – 222 с.
26. Вольфсон Ф.И. Проблемы изучения гидротермальных месторождений. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. – 304 с.
27. Котляр В.Н. О магматических комплексах и оруденении // Советская геология. – 1955. – № 43. – С. 61–70.
28. Дубровский В.Н. О соотношении даек и оруденения на Хрустальном оловянном месторождении // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1957. – № 1. – С. 32–38.
29. Кигай И.Н. Об одной внутриминерализационной дайке Лифудзинского оловянного месторождения // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1957. – № 1. – С. 44–51.
30. Хетчиков Л.Н. О соотношении даек порфиритов со скарново-полиметаллическими рудами на месторождении Первый Советский рудник (Южное Приморье) // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1957. – № 1. – С. 39–43.
31. Мозгова Н.Н. О взаимоотношении дайки диабазового порфирита с оруденелым скарном месторождением Верхнего рудника (Тетюхе, Приморский край) // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1957. – № 1. – С. 25–31.
32. Таусон Л.В. Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. – М.: Наука, 1977. – 267 с.
33. Гусев А.И. Петрология золотогенерирующего магматизма. – М.: Изд-во РАЕ, 2012. – 160 с.
34. Ague I.I., Brimhall G.H. Regional variations in bulk chemistry, mineralogy and the compositions of mafic and accessory minerals in the batholiths of California // Bulletin Geologic Science America. – 1988. – V. 100. – № 6. – P. 891–911.
35. Hart C.J.R. Reduced Intrusion-Related Gold Systems // Economic Geology. – 2006. – V. 101. – № 7. – P. 1415–1427.
36. Leveille R.S.A., Newberry R.J., Bull K.F. An oxidation state-alkalinity diagram for discrimination some gold-favourable plutons: an empirical and phenomenological approach // Geological Society of America. – 1988. – V. 20. – P. 142–153.

37. Ugarkar A.G., Tenginkai S.G. Gold-quartz sulphide reefs of Mangaluru, Gulbarga district, Karnataka // *Current Science*. – 1988. – V. 57. – № 3. – P. 143–145.
38. Plutonic-related Gold Deposits of Interior Alaska / D. McCoy, R.J. Newberry, P.D. Layer, J.J. Marchi, A. Bakke, J.S. Masterman, D.L. Minehane // *Economic Geology Monograph*. – 1997. – V. 9. – P. 191–241.
39. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces / J.F.H. Thompson, R.H. Sillitoe, T. Baker, J.R. Lang, J.K. Mortensen // *Mineral Deposita*. – 1999. – V. 34. – P. 197–217.
40. An exploration model for intrusion-related gold systems / J.R. Lang, T. Baker, C.J.R. Hart, J.K. Mortensen // *Society of Economic Geologists Newsletter*. – 2000. – № 40. – P. 6–14.
41. Lang J.R., Baker T. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding // *Mineral Deposita*. – 2001. – V. 36. – P. 477–489.
42. Mustard R. Granite-hosted gold mineralization at Timbarra, northern New South Wales // *Mineral Deposita*. – 2001. – V. 36. – P. 542–562.
43. Nature, age and tectonic setting of granitoid-hosted, orogenic gold deposits of the Jiaodong Peninsula, eastern North China craton, China / Y.M. Qiu, D.I. Groves, N.J. McNaughton, L.G. Wang, T.H. Shou // *Mineral Deposita*. – 2002. – V. 37. – P. 283–305.
44. Baker T. Emplacement depth and CO₂-rich fluid inclusions in intrusion-related gold deposits // *Economic Geology*. – 2002. – V. 97. – № 5. – P. 1111–1117.
45. Geology, exploration and discovery in the Tintina gold province, Alaska and Yukon / C.J.R. Hart, D.T. McCoy, M. Smith, P. Roberts, R. Hulstein, A.A. Bakke, T.K. Bundtzen // *Society of Economic Geology Spec. Publ.* – 2002. – № 9. – P. 241–274.
46. Geology and geochemistry of the Clear Creek intrusion-related gold occurrences, Tintina Gold Province, Yukon, Canada / E.E. Marsh, R.J. Goldfarb, C.J.R. Hart, C.A. Johnson // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 2003. – V. 40. – № 5. – P. 681–699.
47. Nie F.J., Fiang S.H., Liu Y. Intrusion-related gold deposits of North China Craton, People's Republic of China // *Resources Geology*. – 2004. – V. 54. – P. 299–324.
48. Gold and metals enrichment in natural granitic melts during fractional crystallization / R. Mustard, Thomas U., V.S. Kamenetsky, T. Mernagh // *Geology*. – 2006. – V. 34. – № 2. – P. 82–88.
49. Granite-related Paleoproterozoic, Serrinha gold deposit, Southern Amazonia, Brazil: hydrothermal alteration, fluid inclusions and stable isotope constraints on genesis and evolution / M.A. Moura, N.F. Botelho, G.R. Olivo, T.K. Kyser // *Economic Geology*. – 2006. – V. 101. – № 5. – P. 585–605.
50. Yang H.M., Lentz D.R., Sylvester P.J. Gold contents of sulfide minerals in granitoids from southwestern New Brunswick, Canada // *Mineral Deposita*. – 2006. – V. 41. – P. 369–386.
51. Petrochemical Characteristics of Gold-related Granitoids in Southwestern New Brunswick, Canada / H.M. Yang, D.R. Lentz, G. Chi, K.G. Thorne // *Lithos*. – 2008. – V. 104. – P. 355–377.
52. An intrusion-related gold deposit (IRGD) in the NW of Spain, the Linares deposit: igneous rocks, veins and related alterations, ore features and fluids involved / A. Cepedal, M. Fuertes-Fuente, A. Martin-Isard, J. Garsia-Nieto, M.C. Boiron // *Journal Geochemical Exploration*. – 2013. – V. 124. – P. 101–126.
53. The age, geological setting, and types of gold deposits in the Yunnan and adjacent areas, NE China / Yun-Sheng Ren, Cong Chen, Xin-Tong Zou, Hua-Lei Zhao, Yu-Jie Hao, He Nan Hou, Shao-Chu Hu, Guo-Hao Jiang // *Ore geology Reviews*. – 2015. – V. 73. – P. 2. – P. 284–297.
54. The Vilalba gold district, a new discovery in the Veriscan terranes of the NW Spain: A geologic, fluid inclusions and stable isotope study / Martinez-Abad, A. Sepedal, D. Arias, A. Martin-Isard // *Ore Geology Reviews*. – 2015. – V. 66. – P. 344–365.
55. Electron microprobe analyses of ore minerals and H-O, S isotope geochemistry of the Yuerya gold deposit, eastern Hebei, China: Implications for ore genesis and mineralization / De-Xin Kong, Ji-Feng Xu, Jing-Wu Yin, Jian Lin Chen, Jiao Li, Yuan Guo, Hai-Tao Yang, Xing Kun Shao // *Ore Geology Reviews*. – 2015. – V. 69. – P. 199–216.
56. Ta Nang gold deposit in the black shales of Central Vietnam / Anh Tran Tuan, Gaskov I.V., Hoa Tran Trong, Borisenko A.S., Izokh A.E., Dung Pham Thi, Li Yu Hoang, Mai Nguyen Thi // *Russian Geology and Geophysics*. – 2015. – V. 56. – № 10. – P. 1414–1427.
57. Yao Y., Robb I.J. Gold mineralization in Paleoproterozoic granitoids at Obuasi, Ashanti region, Ghana: Ore geology, geochemistry and fluid characteristics // *South Africa Journal Geology*. – 2000. – V. 103. – № 3–4. – P. 255–278.
58. Кучеренко И.В. Пространственно-временные и петрохимические критерии связи образования золотого оруденения с глубинным магматизмом // *Известия АН СССР. Серия геологическая*. – 1990. – № 10. – С. 78–91.
59. Комаров П.В., Томсон И.Н. О плюмах и их влиянии на формирование благороднометалльного оруденения в углеродсодержащих породах // *Доклады РАН*. – 2007. – Т. 415. – № 6. – С. 779–781.
60. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: evidence from D-O-C-S isotope systematics / J. Mao, Y. Wang, H. Li, F. Pirajno, C. Zhang, R. Wang // *Ore geology Reviews*. – 2008. – V. 33. – P. 361–381.
61. Kucherenco I.V., Gavrillov R.Yu. Femophilic elements in wall-rock metasomatites and in ores of mesothermal gold deposits – newsletter of mantle deep // *International Journal of applied and fundamental research*. – 2011. – № 1. – P. 37–43.
62. Carbon isotope studies of auriferous quartz carbonate veins from two orogenic gold deposits from the Neoproterozoic Chitradurga schist belt, Dharwar craton, India: Evidence for mantle magmatic source of auriferous fluid / S. Sarangi, A. Sarkar, R. Srinivasan, S.C. Patel // *Journal Asian Earth Sci.* – 2012. – V. 52. – P. 1–11.
63. Kucherenco I.V., Zhang Yuxuan. Metallogenic problems of hydrothermal gold deposit formation: facts and arguments // *IOP. Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 24. – 012024. URL: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012024> (дата обращения 25.05.2018).
64. Абрамов Б.Н. О дайковых комплексах мезозойских золоторудных месторождений Восточного Забайкалья // *Современные проблемы магматизма и метаморфизма: Материалы Всероссийской конференции, посвященной 150-летию академико Ф.Ю. Левинсон-Лессинга и 100-летию профессора Г.М. Саранчиной*. – СПб., 1–5 октября 2012. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. – Т. 1. – С. 12–14.
65. Маракушев А.А., Русинов В.Л. Природа золотоносности угле родистых толщ // *Доклады РАН*. – 2005. – Т. 401. – № 4. – С. 515–520.
66. Уникальная ассоциация природной амальгамы золота, киновари, самородных металлов и карбидов Фадеевского рудно-рассыпного узла, Приморье / В.П. Молчанов, А.И. Ханчук, Е.И. Медведев, А.П. Плюснина // *Доклады РАН*. – 2008. – Т. 422. – № 4. – С. 536–538.
67. Кучеренко И.В. Петрология гидротермального метасоматизма долеритов внутрирудных даек мезотермальных месторождений золота. Ч. 1. Кедровское месторождение (Северное Забайкалье) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 325. – № 1. – С. 155–165.
68. Кучеренко И.В. Петрология гидротермального метасоматизма долеритов внутрирудных даек мезотермальных месторождений золота. Ч. 2. Месторождение Зун-Холба (Восточный Саян) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 73–86.

69. Kucherenko I., Zhang Yuxuan, Abramova R. Mineral-petrochemical alteration of rocks in Bericul gold-ore deposit (Kuznetsk Alatau) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012006> (дата обращения 25.05.2018).
70. Kucherenko I., Cherkasova T., Abramova R. Rear polymineral zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012003> (дата обращения 25.05.2018).
71. Кучеренко И.В. Теории, гипотезы гидротермального породорудообразования и реальность: факты и аргументы // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 10. – С. 99–122.
72. Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю. Методологические и методические аспекты исследования связей образования гидротермальных месторождений золота с магматизмом // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Томск, 29 ноября – 2 декабря 2016. – Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2016. – Вып. 8. – С. 219–226.
73. Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., Синкина Е.А. Золоторудное месторождение Чертово Корято: геология, рудно-минеральные комплексы, генезис. – Saarbrücken: Palmarium academic publishing, 2016. – 365 с.
74. Кучеренко И.В. Петролого-геохимические черты рудовмещающего субстрата в гидротермальных месторождениях золота. Ч. 1. Петрология околорудного метасоматизма // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 55–68.
75. Кучеренко И.В. Петролого-геохимические черты рудовмещающего субстрата в гидротермальных месторождениях золота. Ч. 2. Петролого-геохимическая концепция околорудного метасоматизма // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 5. – С. 6–19.
76. Кучеренко И.В. Проблемы рудной геологии и человеческий фактор. Часть 1. Минералого-петрохимическая зональность околорудных метасоматических ореолов в мезотермальных месторождениях золота: теория, эксперимент, природа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 105–118.
77. Кучеренко И.В. Позднепалеозойская эпоха золотого оруденения в докембрийском обрамлении Сибирской платформы // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1989. – № 6. – С. 90–102.
78. Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж. Породообразующие минералы / под ред. В.П. Петрова. – М.: Мир. 1965. – 406 с.
79. Петрографический кодекс России (магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования) / под ред. О.А. Богатикова, О.В. Петрова. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. – 198 с.
80. Владимиров В.Г. Происхождение и механизмы формирования структур магматического минглинга в комбинированных габбро-гранитных дайках // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Томск, 29 ноября – 2 декабря 2017. – Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2017. – Вып. 9. – С. 67–69.
81. Главатских С.Ф., Горшков А.И. Природный аналог α -титана в продуктах эксгаляций Большого трещинного Толбачикского извержения (Камчатка) // Доклады РАН. – 1992. – Т. 327. – № 1. – С. 126–130.
82. Формы нахождения золота в продуктах кристаллизации современных высокотемпературных газовых флюидов вулкана Кудрявый, Курильские острова / М.А. Юдовская, В.В. Дистлер, И.В. Чаплыгин и др. // Доклады РАН. – 2003. – Т. 391. – № 4. – С. 535–539.
83. Антипин В.С. Геохимическая эволюция и происхождение известково-щелочных и субщелочных магматических пород (на основе коэффициентов распределения элементов): дис. ... д-ра геол.-минер. наук. – Иркутск, 1986. – 527 с.

Поступила 04.06.2018 г.

Информация об авторах

Кучеренко И.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 553.3/4.06:552.11–047.58

ORE GEOLOGY PROBLEMS AND THE HUMAN FACTOR. PART 2. MAGMATISM AND MESOTHERMAL ORE-FORMATION

Igor V. Kucherenko,

kivr@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research. The coexistence of the granitic, basaltic, metamorphic, polygenetic hypotheses of one and the same hydrothermal deposits of gold, coloured metals (Sn, W, Mo, Cu, Pb, Zn, Ni, Co) formation stimulates investigations directed on correction, deepening hydrothermal ore-formation theory and improving, development of the forecast-search criteria of the deposits, necessary for the search of new subjects and replenishment of the metals mineral products base.

The main aim of the research is to assess metalliferous ore-forming solutions sources studying the consistency, content, material expression of mesothermal gold deposits formation geologic processes of the south mountain-folded frame of Siberian craton.

The methods: study of the formation consistency, mineral-chemical compositions of accompanying granitoid plutons, massifs, ultra-metamorphic hearth-dome structures dikes of the magmatic rocks, their spatial-time correlations and their relation to ore-mineral complexes, complete chemical (wet) silicate analysis of rocks, roentgen-spectral analysis of chemical compositions of minerals, analysis of the isotope compositions of the sulphide sulphur and carbonaceous carbon of ores and near-ore metasomatites, petro-chemical calculations.

The results of the research. The paper introduces the proofs of generation of the forming mesothermal gold deposits metal-bearing solutions into mantle chambers of the basic melts – the facts of the simultaneous functioning the latter and ore-forming fluids into crust after crystallization of the granitic melts, data about fluid-conducting in hot condition function of the inside-ore dolerite dikes – along with fractures in the routes of metal-bearing solutions rising from the chambers of the generation into forming deposits, the facts of inheritance by the near-ore metasomatites (beresites) of petro-chemical type inside-dike metasomatism (supply K, S, CO₂, subtraction Na, Si), contrasting anomalies into inside-dike and near-ore metasomatites of femic elements (P, Ti, Ca, Mg, Fe, Mn), isotope relations of the sulphide sulphur and carbonaceous carbon relative to mantle marks. The paper discusses negative influence of the human factor on problem solution which consists in priority of the theoretic ideas about generation of metalliferous solutions into crustal chambers of granitic magma – suggested by authority instruction idea though it does not correlate with those observed in deposits facts, which are not congruent with theoretic ideas and therefore they are not attracted for estimating the idea viability. Meanwhile the fact of simultaneous functioning of basic melts in mantle and forming mesothermal deposits of coloured metals solutions in crust after crystallization of granitic melts is proved by existence of aftergranitic till-ore, inside-ore basic dikes – transmitters of information about metalliferous solutions sources. This fact testifies about formation of mesothermal deposits of colour metals and gold on one script, therefore it is recommended to decide the problem of dependence of mesothermal ore-formation by magmatism in coloured metals deposits according to the programme of the research described in this article.

Key words:

Mesothermal deposits of gold and coloured metals, relation of magmatism and ore-formation, granitoid plutons, before-ore, inside-ore, after-ore basic dikes, dikes-fluid-transmitters, mineral-petrochemic types of the inside-dikes and near-ore metasomatism, contrasting anomalies of femic elements, isotope relations of sulphide sulphur and carbonaceous carbon, human factor.

REFERENCES

- Lindgren V. *Mineralnye mestorozhdeniya* [Mineral deposits]. Moscow, ONTI NKTP SSSR Publ., 1934. Iss. 1, 186 p.
- Alabin L.V., Kalinin Yu.A. *Metallogeniya zolota Kuznetskogo Alatau* [Metallogeny of gold of Kuznetsk Alatau]. Novosibirsk, SO RAN NIC OIGGM Publ., 1999. 237 p.
- Thompson J.F.H., Newberry R.J. Gold deposits related to reduced granitic intrusions. *Society of Economic Geologists, Reviews*, 2000, vol. 13, pp. 377–400.
- Gamyarin G.N., Goryachev N.A., Bakharev A.G., Kolesnichenko P.P., Zaytsev A.I., Diman E.N., Berdnikov N.V. *Usloviya zarozhdeniya i evolyutsii granitoidnykh zolotorudno-magmaticeskikh sistem v mezozoydakh Severo-Vostoka Azii* [Conditions of occurrence and evolution of granitoid gold-ore-magmatic systems in Mesozooids of North-east of Asia]. Magadan, SV KNII DVO RAN Publ., 2003. 196 p.
- Sidorov A.A., Volkov A.V. O zolotorudnykh mestorozhdeniyakh v granitoidakh [Gold-ore deposits in granitoids]. *Doklady RAN*, 2000, vol. 375, no. 6, pp. 806–811.
- Yang X.M., Lentz D.R., Chi G., Thome K.G. Petrochemical characteristics of gold-related granitoids in Southwestern New Brunswick, Canada. *Explor Mining Geology*, 2004, vol. 31, pp. 34–47.
- Yang X.M., Lentz D.R. Chemical composition of rock-forming minerals in gold-related granitoid intrusions, Southwestern New Brunswick, Canada: implications for crystallization conditions, volatile exsolution and fluorine-chlorine activity. *Contribution Mineral Petroleum*, 2005, vol. 150, pp. 287–305.
- Khomichev V.L. Model zolotonosnoy gabbro-diorit-granodioritovoy formatsii [Model of gold-bearing gabbro-diorite-granodiorite formation]. *Petrologiya i rudoobrazovanie* [Petrology and ore formation]. Novosibirsk, SNIIGiMS Publ., 2005. pp. 58–70.
- Nozhkin A.D., Borisenko A.S., Nevolko P.A. Pozdneproterozoy-sky riftogeny i vnutriplitny magmatizm, zolotoe i zoloto-uranovoe orudnenie Eniseyskogo kryazha [Late Proterozoic rift related and inter-layer magmatism, gold and gold-uranium mineralization of Yenisei Ridge]. *Sovremennye problemy geologii i razvedki poleznykh iskopaemykh. Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferencii* [Current problems of geology and exploration. Proc. of International scientific conference]. Tomsk, 5–8 October 2010. Tomsk, TPU Publ. house, 2010. pp. 266–274.
- Fershtater G.B., Kholodnov V.V., Kremenetsky A.A., Krasnobaev A.A., Borodina N.S., Zinkova E.A., Pribavkin S.V. Gold-bearing gabbro-tonalite-granodiorite-granite arrays of the Urals: age, geochemistry, features of magmatic and ore evolution. *Geologiya rudnykh mestorozhdeny*, 2010, vol. 32, no. 1, pp. 65–84.

11. Gusev A.I., Gusev A.A. *Shoshonitovye granitoidy: petrologiya, geokhimiya, flyuidnyy rezhim, rudonosnost* [Shoshonit granitoids: petrology, geochemistry, fluid mode, ore content]. Moscow, RAE Publ., 2011. 125 s.
12. Rafailovich M.S., Mizernaya M.A., Dyachkov B.A. *Krupnye mestorozhdeniya zolota v chernoslantsevyykh tolshchakh: usloviya formirovaniya, priznaki skhodstva* [Large gold deposits in black-shale strata: conditions of formation, similarity characteristics]. Almaty, KazIMS Publ., 2011. – 272 s.
13. Emmons U.Kh. *Vvedenie v uchenie o rudnykh mestorozhdeniyakh* [Introduction into the study of ore deposits]. Moscow; Leningrad, 1925. 206 p.
14. Stepanov V.A. *Zonalnost zoloto-kvartsevoogo orudneniya Tsentralnoy Kolymy* [Zoning of gold-quartz mineralization of Central Kolyma]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2001. 70 s.
15. Gorzhevsky D.I., Kozerenko V.N. *Svyaz endogennogo rudoobrazovaniya s magmatizmom i metamorfizmom* [Relation of endogenic ore formation to magmatism and metamorphism]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 300 p.
16. Serdyuk S.S. *Zolotonosnye provintsii Tsentralnoy Sibiri: geologiya, minerageniya, perspektivy osvoeniya* [Gold-bearing provinces in Central Siberia: geology, minarageny, prospects of exploration]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Publ., 2004. 478 p.
17. Abdullaev Kh.M. *Dayki i orudnenie* [Dikes and mineralization]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1957. 232 p.
18. Mironov A.G., Zhmodik S.M. *Zolotorudnye mestorozhdeniya Urik-Kitoyaskoy metallogenicheskoy zony (Vostochny Sayan, Rossiya)* [Gold-ore deposits of Urik-Ketoysk metallogenic area (Eastern Sayan, Russia)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1999, vol. 41, no. 1, pp. 54–69.
19. Ryabchikov I.D., Efimov A.E., Kulagin V.M., Shilin N.L. *Fiziko-khimicheskiy analiz povedeniya zolota v protsesse degazatsii magm* [Physical and chemical analysis of gold behavior in magma gas drainage]. *Problemy geokhimii endogennykh protsessov* [Problems of geochemistry of endogenic processes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. pp. 14–18.
20. Zhatnuev N.S., Mironov A.G., Dampilov D.A., Bugaeva N.G. *Ekspperimentalnoe issledovanie povedeniya zolota v magmaticheskoy i gidrotermalnoy protsessakh (k probleme istochnikov veshchestva zolotorudnykh mestorozhdeniy)* [Experimental study of gold behavior in magmatic and hydrothermal processes (problem of the sources substance of gold-ore deposits)]. *Zoloto Sibiri: geologiya, geokhimiya, tekhnologiya, ekonomika. Tezisy dokladov i Sibirskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem* [Gold of Siberia: geology, geochemistry, technology, economics. Proc. of Siberian symposium with International participation]. Krasnoyarsk, 1–3 December, 1999. Krasnoyarsk, KGACMiZ Publ., 1999. pp. 101–103.
21. Kovalenko V.I., Kuzmin M.I., Koval V.V. *Geokhimicheskie tipy mezozoyskikh granitoidov Mongolii i ikh metallogeniya* [Geochemical types of Mesozoic granitoids of Mongolia and their metallogeny]. *Zakonomernosti razmeshcheniya poleznykh iskopaemykh* [Laws of distribution of mineral deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1975. Vol. XI, pp. 329–334.
22. Shilin N.L., Kumeev S.S., Koloskov A.V. *Zoloto v kalievyykh polevykh shpatakh iz intruzivnykh i metasomaticheskikh obrazovaniy* [Gold in potassium feldspar from intrusive and metasomatic formations]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geologicheskaya*, 1988, no. 10, pp. 93–101.
23. Amuzinsky V.A. *Geokhimicheskie osobennosti raspredeleniya zolota v magmaticheskikh porodakh Verkhoyanskoy antiklinalnoy zony* [Geochemical features of gold distribution in magmatic rocks of Verkhoyansk anticline zone]. *Mineralogiya i geokhimiya proizvodnykh granitoidnogo magmatizma* [Mineralogy and geochemistry of granitoid magmatism derivatives]. Yakutsk, Institut geologii Jakut. filiala SO AN SSSR, 1981. – S. 89–98.
24. Dunin-Barkovskaya E.A., Smirnova S.K., Kozlov V.V. *Flyuidnyy rezhim formirovaniya vazhneyshikh produktivnykh mineralnykh assotsiatsiy i paragenizov zolotorudnykh, redkometalnykh i flyuoritovykh mestorozhdeniy Uzbekistana* [Fluid mode of formation of the most important productive mineral associations and paragenesis of gold-ore, rare-metal and fluorite deposits in Uzbekistan]. *Mineraloobrazuyushchie flyuidy i rudogenez* [Mineral-forming fluids and ore genesis]. Tashkent, 1998. pp. 69–72.
25. Gamyarin G.N. *Mineralogo-geokhimicheskie aspekty zolotogo orudneniya Verkhoyano-Kolymskikh mezozoid* [Mineralogic and geochemical aspects of gold mineralization of Verkhoyan-Kolyma mezozoid]. Moscow, GEOS Publ., 2001. 222 p.
26. Volfson F.I. *Problemy izucheniya gidrotermalnykh mestorozhdeniy* [Problems of studying hydrothermal deposits]. Moscow, AN SSSR Publ., 1953. 304 p.
27. Kotlyar V.N. *O magmaticheskikh kompleksakh i orudnenii* [On magmatic complexes and mineralization]. *Sovetskaya geologiya*, 1955, no. 43, pp. 61–70.
28. Dubrovsky V.N. *O sootnoshenii daek i orudneniya na Khrustalnom olovyannom mestorozhdenii* [On the ratio of dikes and mineralization in Khrustalnoe tin deposit]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geologicheskaya*, 1957, no. 1, pp. 32–38.
29. Kigay I.N. *Ob odnoy vnutrimineralizatsionnoy dayke Lifudzinskogo olovorudnogo mestorozhdeniya* [About one intermineralization dike of Lifudzinsk tin-ore deposit]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geologicheskaya*, 1957, no. 1, pp. 44–51.
30. Khetchikov L.N. *O sootnoshenii daek porfiritov so skarnovo-polimetallicheskim rudami na mestorozhdenii Pervy Sovetskiy rudnik (Yuzhnoe Primorye)* [On the ratio of dikes of porphyrites with skarn-polymetallic ores in Pervy Sovetskiy mine deposit (South Primorye)]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geologicheskaya*, 1957, no. 1, pp. 39–43.
31. Mozgova N.N. *O vzaimootnoshenii dayki diabazovogo porfiritita s orudneniyem skarnom mestorozhdeniya Verkhnego rudnika (Tetyukhe, Primorskiy kray)* [On the relation of diabase porphyrite dyke with the mineralized skarn of Verkhny mine deposit (Tetyukhe, Primorye Territory)]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geologicheskaya*, 1957, no. 1, pp. 25–31.
32. Tauson L.V. *Geokhimicheskie tipy i potentsialnaya rudonosnost granitoidov* [Geochemical types and potential ore content of granitoids]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 267 p.
33. Gusev A.I. *Petrologiya zolotogeneriruyushchego magmatizma* [Petrology of gold-generating magmatism]. Moscow, RAE Publ., 2012. 160 p.
34. Ague I.L., Brimhall G.H. *Regional variations in bulk chemistry, mineralogy and the compositions of mafic and accessory minerals in the batholiths of California*. *Bulletin Geologic Science America*, 1988, vol. 100, no. 6, pp. 891–911.
35. Hart C.J.R. *Reduced Intrusion-Related Gold Systems*. *Economic Geology*, 2006, vol. 101, no. 7, pp. 1415–1427.
36. Leveille R.S.A., Newberry R.J., Bull K.F. *An oxidation state-alkalinity diagram for discrimination some gold-favourable plutons: An empirical and phenomenological approach*. *Geological Society of America*, 1988, vol. 20, pp. 142–153.
37. Ugarkar A.G., Tenginkai S.G. *Gold-quartz sulphide reefs of Mangaluru, Gulbarga district, Karnataka*. *Current Science*, 1988, vol. 57, no. 3, pp. 143–145.
38. McCoy D., Newberry R.J., Layer P.D., Marchi J.J., Bakke A., Masterman J.S., Minehane D.L. *Plutonic-related Gold Deposits of Interior Alaska*. *Economic Geology Monograph*, 1997, vol. 9, pp. 191–241.
39. Thompson J.F.H., Sillitoe R.H., Baker T., Lang J.R., Mortensen J.K. *Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces*. *Mineral Deposita*, 1999, vol. 34, pp. 197–217.
40. Lang J.R., Baker T., Hart C.J.R. and Mortensen J.K. *An exploration model for intrusion-related gold systems*. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 2000, no. 40, pp. 6–14.

41. Lang J.R., Baker T. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding. *Mineral Deposita*, 2001, vol. 36, pp. 477–489.
42. Mustard R. Granite-hosted gold mineralization at Timbarra, northern New South Wales. *Mineral Deposita*, 2001, vol. 36, pp. 542–562.
43. Qiu Y.M., Groves D.I., McNaughton N.J., Wang L.G., Shou T.H. Nature, age and tectonic setting of granitoid-hosted, orogenic gold deposits of the Jiaodong Peninsula, eastern North China craton, China. *Mineral Deposita*, 2002, vol. 37, pp. 283–305.
44. Baker T. Emplacement depth and CO₂-rich fluid inclusions in intrusion-related gold deposits. *Economic Geology*, 2002, vol. 97, no. 5, pp. 1111–1117.
45. Hart C.J.R., McCoy D.T., Smith M., Roberts P., Hulstein R., Bakke A.A., Bundtzen T.K. Geology, exploration and discovery in the Tintina gold province, Alaska and Yukon. *Society of Economic Geology Spec. Publ.*, 2002, no. 9, pp. 241–274.
46. Marsh E.E., Goldfarb R.J., Hart C.J.R., Johnson C.A. Geology and geochemistry of the Claar Creek intrusion-related gold occurrences, Tintina Gold Province, Yukon, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2003, vol. 40, no. 5, pp. 681–699.
47. Nie F.J., Fiang S.H., Liu Y. Intrusion-related gold deposits of North China Craton, People's Republic of China. *Resources Geology*, 2004, vol. 54, pp. 299–324.
48. Mustard R., Ulrich Th., Kamenetsky V.S., Mernagh T. Gold and metals enrichment in natural granitic melts during fractional crystallization. *Geology*, 2006, vol. 34, no. 2, pp. 82–88.
49. Moura M.A., Botelho N.F., Olivo G.R., Kyser T.K. Granite-related Paleoproterozoic, Serrinha gold deposit, Southern Amazonia, Brazil: hydrothermal alteration, fluid inclusions and stable isotope constraints on genesis and evolution. *Economic Geology*, 2006, vol. 101, no. 5, pp. 585–605.
50. Yang H.M., Lentz D.R., Sylvester P.J. Gold contents of sulfide minerals in granitoids from southwestern New Brunswick, Canada. *Mineral Deposita*, 2006, vol. 41, pp. 369–386.
51. Yang H.M., Lentz D.R., Chi G., Thorne K.G. Petrochemical Characteristics of Gold-related Granitoids in Southwestern New Brunswick, Canada. *Lithos*, 2008, vol. 104, pp. 355–377.
52. Cepedal A., Fuertes-Fuente M., Martin-Izard A., Garsia-Nieto J., Boiron M.C. An intrusion-related gold deposit (IRGD) in the NW of Spain, the Linares deposit: igneous rocks, veins and related alterations, ore features and fluids involved. *Journal Geochemical Exploration*, 2013, vol. 124, pp. 101–126.
53. Yun-Sheng Ren, Cong Chen, Xin-Tong Zou, Hua-Lei Zhao, Yu-Jie Hao, He Nan Hou, Shao-Chu Hu, Guo-Hao Jiang. The age, geological setting, and types of gold deposits in the Yanbian and adjacent areas, NE China. *Ore geology Reviews*, 2015, vol. 73, P. 2, pp. 284–297.
54. Martinez-Abad, Sepedal A., Arias D., Martin-Isard A. The Vilalba gold district, a new discovery in the Variscan terranes of the NW Spain: A geologic, fluid inclusions and stable isotope study. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 66, pp. 344–365.
55. De-Xin Kong, Ji-Feng Xu, Jing-Wu Yin, Jian Lin Chen, Jiao Li, Yuan Guo, Hai-Tao Yang, Xing Kun Shao. Electron microprobe analyses of ore minerals and H-O, S isotope geochemistry of the Yuerya gold deposit, eastern Hebei, China: Implications for ore genesis and mineralization. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 69, pp. 199–216.
56. Anh Tran Tuan, Gaskov I.V., Hoa Tran Trong, Borisenko A.S., Izokh A.E., Dung Pham Thi, Li Yu Hoang, Mai Nguyen Thi. Ta Nang gold deposit in the black shales of Central Vietnam. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 10, pp. 1414–1427.
57. Yao Y., Robb I.J. Gold mineralization in Paleoproterozoic granitoids at Obuasi, Ashanti region, Ghana: Ore geology, geochemistry and fluid characteristics. *South Africa Journal Geology*, 2000, vol. 103, no. 3–4, pp. 255–278.
58. Kucherenko I.V. Prostranstvenno-vremennye i petrokhimicheskie kriterii svyazi obrazovaniya zolotogo orudneniya s glubinyim magmatizmom [Space-time and petrochemical criteria of relation of gold mineralization formation to deep magmatism]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geologicheskaya*, 1990, no. 10, pp. 78–91.
59. Komarov P.V., Tomson I.N. Plumes and their effect on formation of noble metal mineralization in carbon-containing rocks. *Doklady RAN*, 2007, vol. 415, no. 6, pp. 779–781.
60. Mao J., Wang Y., Li H., Pirajno F., Zhang C., Wang R. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: evidence from D-O-C-S isotope systematics. *Ore geology Reviews*, 2008, vol. 33, pp. 361–381.
61. Kucherenko I.V., Gavrillov R.Yu. Femophilic elements in wall-rock metasomatites and in ores of mesothermal gold deposits – newsletter of mantle deep. *International Journal of applied and fundamental research*, 2011, no. 1, pp. 37–43.
62. Sarangi S., Sarkar A., Srinivasan R., Patel S.C. Carbon isotope studies of auriferous quartz carbonate veins from two orogenic gold deposits from the Neoproterozoic Chitradurga schist belt, Dharwar craton, India: Evidence for mantle magmatic source of auriferous fluid. *Journal Asian Earth Sci.*, 2012, vol. 52, pp. 1–11.
63. Kucherenko I.V., Zhang Yuxuan. Metallogenic problems of hydrothermal gold deposit formation: facts and arguments. *IOP. Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24, 012024. Available at: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012024> (accessed 25 May 2018).
64. Abramov B.N. O daykovykh kompleksakh mezozoyskikh zolotrudnykh mestorozhdeniy Vostochnogo Zabaykalya [Dike complexes of Mesozoic gold-ore deposits in Eastern Trans-Baikal]. *Sovremennye problemy magmatizma i metamorfizma. Materialy Vserossiyskoy konferentsii, posvyashchenoy 150-letiyu akademika F.Yu. Levinson-Lessinga i 100-letiyu professora G.M. Saranchinoy* [Current problems of magmatism and metamorphism. Proc. of All-Russian conference devoted to the 150th anniversary of academician F.Yu. Levinson-Lessing and 100th anniversary of professor G.M. Saranchina]. St-Petersburg, 1–5 October 2012. St-Petersburg, SPbGU Publ., 2012. Vol. 1, pp. 12–14.
65. Marakushev A.A., Rusinov V.L. Priroda zolotonosnosti uglerodistykh tolshch [Origin of gold content of carbon formations]. *Doklady RAN*, 2005, vol. 401, no. 4, pp. 515–520. In Rus.
66. Molchanov V.P., Khanchuk A.I., Medvedev E.I., Plyusnina A.P. unique association of natural gold amalgam, cinnabar, native metals and carbides of Fadeevsky ore-placer deposit, Primorye. *Doklady RAN*, 2008, vol. 422, no. 4, pp. 536–538. In Rus.
67. Kucherenko I.V. Petrology of hydrothermal metasomatism of intra-ore dolerite dikes of mesothermal gold deposits. P. 1. Kedrovskoe deposit (North Trans-Baikal). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. The Planet Resources*, 2014, vol. 325, no. 1, pp. 155–165. In Rus.
68. Kucherenko I.V. Petrology of hydrothermal metasomatism into intra-ore dolerite dikes of mesothermal gold deposits. P. 2. Zun-Kholba deposit (East Sayan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. The Planet Resources*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 73–86. In Rus.
69. Kucherenko I., Zhang Yuxuan, Abramova R. Mineral-petrochemical alteration of rocks in Bericul gold-ore deposit (Kuznetsk Alatau). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012006> (accessed 25 May 2018).
70. Kucherenko I., Cherkasova T., Abramova R. Rear polymetallic zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27 Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012003> (accessed 25 May 2018).

71. Kucherenko I.V. Theories, hypotheses of hydrothermal rock-ore formation and reality: facts and arguments. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 10, pp. 99–122. In Rus.
72. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu. Metodologicheskie i metodicheskie aspekty issledovaniya svyazey obrazovaniya gidrotermalnykh mestorozhdeniy zolota s magmatizmom [Methodological aspects of studying the relation of gold hydrothermal deposit formation to magmatism]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov. Materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Proc. of All-Russian conference with international participation]. Tomsk, 29 November – 2 December 2016. Tomsk, Tomsk TsNTI Publ., 2016. Iss. 8, pp. 219–226.
73. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Sinkina E.A. *Zolotorudnoe mestorozhdenie Chertovo Koryto: geologiya, rudno-mineralnye komplekсы, genesis* [Gold-ore deposit Chertovo Koryto: geology, ore-mineral complexes, genesis]. Saarbrücken, Palmarium academic publishing, 2016. 365 p.
74. Kucherenko I.V. Petrologic and geochemic features of the ore-containing substratum in hydrothermal gold deposits. P. 1. Petrology of the near-ore metasomatism. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 55–68. In Rus.
75. Kucherenko I.V. Petrologic and geochemic features of ore-containing substratum in hydrothermal gold deposits. P. 2. Petrologic and geochemical concept of near-ore metasomatism. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 5, pp. 6–19. In Rus.
76. Kucherenko I.V. Ore geology problems and the human factor. P. 1. Mineral-petrochemic zoning of the near-veins metasomatic aureoles in the mesothermal gold deposits: theory, experiment, nature. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 105–118. In Rus.
77. Kucherenko I.V. Pozdnepaleozoyskaya epokha zolotogo orudneniya v dokembrijskom obramlenii Sibirskoy platform [Late-Paleozoic age of goldmineralisation in pre-Cambrian framing of Siberian platform]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geologicheskaya*, 1989, no. 6, pp. 90–102.
78. Dir U.A., Hai R.A., Zusman Dzh. *Porodoobrazuyushchie mineral* [Rock-forming minerals]. Ed. by V.P. Petrov. Moscow, Mir Publ., 1965. 406 p.
79. *Petrografichesky kodeks Rossii (magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya)* [Petrographic code of Russia (magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations)]. Ed. by O.A. Bogatkov, O.V. Petrov. St-Petersburg, VSEGEI Publ., 2008. 198 p.
80. Vladimirov V.G. Proiskhozhdenie i mekhanizmy formirovaniya struktur magmaticheskogo minglinga v kombinirovannykh gabbro-granitnykh daykakh [Origin and mechanisms of formation of structures of magmatic mingling in complex gabbro-granite dikes]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov. Materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Proc. of All-Russian conference with international participation]. Tomsk, 29 November – 2 December 2017. Tomsk, Tomsk TsNTI Publ., 2017. Iss. 9, pp. 67–69.
81. Glavatskikh S.F., Gorshkov A.I. Prirodny analog α -titana v produktakh ekskalyatsiy Bolshogo treshchinogo Tolbachikskogo izverzheniya (Kamchatka) [Natural analogue of α -titanium in exhalation products of Bolshoe fissure Tolbachikskoe eruption (Kamchatka)]. *Doklady RAN*, 1992, vol. 327, no. 1, pp. 126–130.
82. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Chaplygin I.V. Formy nakhozhdeniya zolota v produktakh kristallizatsii sovremennykh vysokotemperaturnykh gazovykh flyuidov vulkana Kudryavy, Kurilskie ostrova [Forms of gold occurrence in crystallization products of modern high-temperature gaseous fluids of volcano Kudryavy, Kuril Islands]. *Doklady RAN*, 2003, vol. 391, no. 4, pp. 535–539.
83. Antipin V.S. *Geokhimicheskaya evolyutsiya i proishozhdenie izvestkovo-shchelochnykh i subshchelochnykh magmaticheskikh porod (na osnove koefitsientov raspredeleniya elementov)*. Dis. Dokt. Nauk [Geochemical evolution and origin of calc-alkalic and subalkalic magmatic rocks (based on element distribution coefficients)]. Irkutsk, 1986. 527 p.

Received: 4 June 2018.

Information about the authors

Igor V. Kucherenko, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректурa и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 29.06.2018. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 16,75. Уч.-изд. л. 15,15.
Заказ xxx-18. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ