



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

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

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 330, № 7, 2019

Издательство
Томского политехнического университета
2019

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)
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
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)
Зиятдинов 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)
Кириянова 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, 2019

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 геоактивов.

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 330, № 7, 2019

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)
 Belozerov V.B., Dr. Sc. (Russia)
 Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)
 Silkin V.M., PhD (Spain)
 Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)
 Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)
 Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)
 Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)
 Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
 Teipel U., Dsc (Germany)
 Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)
 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)
 Bouznic 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 SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

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

- | | | |
|--|--|--|
| <p>Аномальное геохимическое поле золоторудного месторождения Чертово Корыто (Ленский рудный район)
Гаврилов Р.Ю.</p> <p>Анализ возможного метода использования геотермальной энергии
Нурпейис А.Е.</p> <p>Геомеханическое обоснование параметров устойчивых камер и целиков в сложных горно-геологических условиях
Харисов Т.Ф., Харисова О.Д.</p> <p>О применении геодинамических литохимических диаграмм при изучении тефрогенных песчаников
Фазлиахметов А.М.</p> <p>Сжигание модельных и реальных нефтешламов в кипящем слое катализатора
Дубинин Ю.В., Языков Н.А., Симонов А.Д., Яковлев В.А.</p> <p>Гидрогеологические прогнозы в целях осушения месторождения алмазов им. В. Гриба
Еланцева Л.А., Зайцев Д.А., Фоменко С.В.</p> <p>Выбор оптимального количества котлоагрегатов при реконструкции источника теплоснабжения
Збараз Л.И., Чичерин С.В.</p> <p>Источники рудоносных флюидов Au, Mo, W и Pb-Zn месторождений Восточного Забайкалья (по данным распределения редких и редкоземельных элементов)
Абрамов Б.Н.</p> <p>Акцессорные самородные металлы и их оксиды из массивных хромитов Кемпирсайского ультрамафитового массива (Южный Урал, Казахстан)
Юричев А.Н.</p> <p>Содержание ртути в эпифитных лишайниках на территории республики Крым
Евстафьева Е.В., Богданова А.М., Большунова Т.С., Барановская Н.В., Осипова Н.А.</p> <p>Фильтрация жидкостей в аномальных коллекторах
Грачев С.И., Коротенко В.А., Кушакова Н.П., Кряквин А.Б., Зотова О.П.</p> <p>Применение псевдволновых трансформант в импульсной электроразведке для выделения наклонных геологических границ
Грецов Г.А., Эпов М.И., Шеин А.Н.</p> <p>Анализ отложений неорганических солей в системе сбора НСП «Б», ДНС-5 «А»
Яркеева Н.Р., Галкова А.Ф.</p> <p>Использование электроосмотического эффекта для осушения барьеров безопасности при выводе из эксплуатации ядерно- и радиационно опасных объектов
Антоненко М.В., Леонов А.В., Беспала Е.В., Чубреев Д.О., Беспала Ю.Р.</p> <p>Минералого-геохимические особенности источника Ямкун (Забайкальский Край)
Соктоев Б.Р., Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Замана Л.В., Рудмин М.А., Эпова Е.С., Солодухина М.А., Етенко К.А., Михайлова Л.А., Холмогорова И.В.</p> <p>Оптимизация геометрии зубцовой зоны гистерезисной муфты запорной арматуры нефтепровода
Гарганеев А.Г., Динь К.К., Сипайлова Н.Ю., Кашин Е.И.</p> | <p>7</p> <p>17</p> <p>25</p> <p>34</p> <p>44</p> <p>53</p> <p>62</p> <p>71</p> <p>84</p> <p>93</p> <p>104</p> <p>114</p> <p>123</p> <p>130</p> <p>140</p> <p>155</p> | <p>Anomalous geochemical field of the Chertovo Koryto gold deposit (Lensky ore district)
Gavrilov R.Yu.</p> <p>Analysis of potential method of geothermal energy application
Nurpeiis A.E.</p> <p>Geomechanical substantiation of the parameters of stable chambers and pillars in complex mining and geological conditions
Kharisov T.F., Kharisova O.D.</p> <p>On application of geodynamic lithochemical diagrams in studying tefrogenic sandstones
Fazliakhmetov A.M.</p> <p>Combustion of model and real oil sludge in a fluidized bed of catalyst
Dubinin Yu.V., Yazykov N.A., Simonov A.D., Yakovlev V.A.</p> <p>Hydrogeological forecasts for dewatering diamond deposit named after V. Grib
Elantseva L.A., Zaitsev D.A., Fomenko S.V.</p> <p>Configuring a district heating plant under reconstruction: optimum quantity of boiler units
Zbaraz L.I., Chicherin S.V.</p> <p>Sources of ore-bearing fluids Au, Mo, W and Pb-Zn of Eastern Transbaikalia deposits (according to the rare earth elements distribution)
Abramov B.N.</p> <p>Accessory native metals and their oxides from massive chromitites of Kempirsai ultramafic massif (South Ural, Kazakhstan)
Yurichev A.N.</p> <p>Mercury content in the epiphytic lichens of Crimea Republic
Evstafeva E.V., Bogdanova A.M., Bolshunova T.S., Baranovskaya N.V., Osipova N.A.</p> <p>Liquid filtration in anomalous collectors
Grachev S.I., Korotenko V.A., Kushakova N.P., Kryakvin A.B., Zotova O.P.</p> <p>Applying pseudowave transformation in transient electromagnetic prospecting for recognition of inclined geological boundaries
Gretskov G.A., Epov M.I., Shein A.N.</p> <p>Analysis of deposits of inorganic salts in the system of collection of NSP «B», BPS-5 «A»
Yarkeeva N.R., Galkova A.F.</p> <p>Application of electroosmotic effect for unwatering safety barriers during decommissioning nuclear legacy
Antonenko M.V., Leonov A.V., Bespala E.V., Chubreev D.O., Bespala Yu.R.</p> <p>Mineral and geochemical features of Yamkun spring (Transbaikalia region)
Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Zamana L.V., Rudmin M.A., Epova E.S., Solodukhina M.A., Etenko K.A., Mikhailova L.A., Kholmogorova I.V.</p> <p>Optimization of hysteresis clutch teeth zone geometry in oil pipeline shut-off valves
Garganeev A.G., Din K.K., Sipaylova N.Yu., Kashin E.I.</p> |
|--|--|--|

- | | |
|---|---|
| <p>Проблемы рудной геологии и человеческий фактор.
 Часть 4. Метаморфизм и мезотермальное
 рудообразование
 Кучеренко И.В.</p> <p>Многокритериальная оптимизация при управлении
 химико-технологической системой производства
 бензола при нечеткой информации
 Оразбаев Б.Б., Оспанов Е.А.,
 Оразбаева К.Н., Серимбетов Б.А.</p> <p>Моделирование геологического строения
 продуктивных отложений Викуловской свиты
 Казанская Д.А., Александров В.М., Белкина В.А.</p> <p>Эволюция физико-химических условий
 кристаллизации расплавов при формировании дунит-
 перидотит-габбровых массивов Восточного Саяна
 Ступаков С.И., Симонов В.А.,
 Мехоношин А.С., Колотилина Т.Б.</p> | <p>165 Ore geology problems and the human factor.
 Part 4. Metamorphism and mesothermal
 oreformation
 Kucherenko I.V.</p> <p>182 Multicriteria optimization in control
 of a chemical-technological system for production
 of benzene with fuzzy information
 Orazbayev B.B., Ospanov Y.A.,
 Orazbayeva K.N., Serimbetov B.A.</p> <p>195 Geological modelling of vikulovskaya suite
 production deposits
 Kazanskaya D.A., Alexandrov V.M., Belkina V.A.</p> <p>208 Evolution of physico-chemical conditions of crystallization
 of melts during formation of dunite-peridotite-gabbroic
 massifs of the Eastern Sayan
 Stupakov S.I., Simonov V.A.,
 Mekhonoshin S.A., Kolotilina T.B.</p> |
|---|---|

УДК 553.411.071:550.4

АНОМАЛЬНОЕ ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧЕРТОВО КОРЫТО (ЛЕНСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН)

Гаврилов Роман Юрьевич,
GavrilovRY@tpu.ru

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности прогнозно-поисковых работ на рудное золото на основе геохимических данных.

Цель: создание модели аномальной структуры геохимического поля месторождения Чертово Кoryто для выявления дополнительных прогнозно-поисковых критериев золоторудных объектов в углеродисто-карбонатно-терригенных толщах.

Методы: статистическая обработка геохимических данных, геохимическое моделирование.

Объект: первичный геохимический ореол золоторудного месторождения Чертово Кoryто.

Результаты. Статистические параметры распределения металлов в крупнообъемном метасоматическом ореоле свидетельствуют об интенсивных гидротермально-метасоматических процессах, выразившихся, в первую очередь, в отложении высококонцентрированных растворов, содержащих Au, As, Ag, Pb. На основе обработки геохимических данных по первичным ореолам рассеяния создана модель геохимической зональности золоторудного месторождения Чертово Кoryто. Установлено концентрически-зональное строение аномальной структуры геохимического поля месторождения. Ранняя Ba-Be-Zr-Ti-Y ассоциация элементов, выщелоченных и перетолженных в процессе кислотного метасоматоза (кварц-рутил-пирит-пирротиновый комплекс), окаймляет периферию минерализованной зоны. В промежуточной зоне метасоматического ореола распространена Cr-Ni-Co-Mn-V-Sn-P-(As) геохимическая ассоциация, обусловленная образованием кварц-пирит-арсенопирит-пирротинового комплекса, завершающего березитизацию. Отложение Au-As ассоциации происходило в более позднее время, с образованием арсенопирита в составе кварц-пирит-арсенопиритового с золотом минерального комплекса. Наиболее поздняя ассоциация Au-Ag-Pb-Zn-Cu полиметаллической с золотом стадии рудообразования (золото, галенит, сфалерит, халькопирит) приурочена к центральной части метасоматически измененных пород. Комплекс методов обработки геохимической информации совместно с использованием данных минералого-геохимического картирования обеспечил расшифровку аномальной структуры геохимического поля месторождения. Полученные результаты позволили дополнить существующее представление об аномальной структуре геохимического поля золоторудного месторождения Чертово Кoryто.

Ключевые слова:

Золото, Ленский рудный район, аномальная структура геохимического поля, геохимическая зональность, математическая статистика.

Постановка задачи

В последнее десятилетие поисковая геохимия переживает бурные времена, связанные с внедрением новых методов и методик обработки геохимической информации [1–12]. В первую очередь это связано с проведением работ в более сложных горно-геологических условиях, что требует применения нестандартных решений, зачастую более трудозатратных и, как следствие, дорогостоящих, но позволяющих выйти на конкретный объект с оценкой прогнозных ресурсов и подсчетом запасов соответствующих категорий [13]. Стандартные наборы методов обработки фактического материала не всегда позволяют получать адекватную информацию об объекте исследования [14]. Уникальные месторождения золота (Олимпиадинское, Наталка, Сухой Лог и др.) уже открыты и эксплуатируются, а для регулярного наращивания запасов металла недостаточно проводить их переоценку, необходимо открытие десятков крупных–мелких месторождений либо перевод ресурсов в промышленные категории уже известных объектов. Все это, применительно к российской геологоразведочной отрасли, делает жизненно необходимым использование в прогнозно-поисковой практике нетрадиционных подходов.

Одной из основ успешного прогнозирования месторождений полезных ископаемых является разработка геохимических, минералогических, геофизических, структурно-динамических и других моделей месторождений. Процесс создания корректной модели месторождения зависит от качества фактического материала, методов его обработки, интерпретации и квалификации исполнителя. В настоящее время существующими методами обработки геохимических данных возможно успешно переинтерпретировать имеющийся банк аналитической информации второй половины прошлого столетия.

В 2006–2007 гг. на золоторудном месторождении Чертово Кoryто силами сотрудников Томского политехнического университета под руководством профессора И.В. Кучеренко на основе хозяйственно-договорных отношений с ООО «Тонода» (дочерней компанией ОАО «Ленская золоторудная компания», г. Бодайбо) проводились полевые исследования с отбором каменного материала [15–21].

Целью настоящей работы явилось создание модели аномальной структуры геохимического поля (АСГП) золоторудного месторождения, залегающего в углеродисто-терригенном субстрате, с использованием максимально возможного перечня

определенных элементов, для выявления дополнительных поисковых критериев золоторудных объектов в углеродисто-карбонатно-терригенных толщах.

Геологическая характеристика месторождения

Наиболее подробно месторождение Чертово Кори́то охарактеризовано в работах [15, 16]. Оно расположено в Иркутской области, на водоразделе рр. Тоноды и Кевакты, бассейна р. Бол. Патома, в 185 км севернее районного центра г. Бодайбо.



Рис. 1. Географическое положение месторождения Чертово Кори́то

Fig. 1. Location of the Chertovo Koryto deposit

Вмещающая оруденение раннепротерозойская толща углеродистых терригенных сланцев михайловской свиты образует брахисинклинальную складку с пологим ($10...20^\circ$) падением слоев. Южное направление падения слоев на севере сменяется на западное и далее на северо-северо-западное – на юге месторождения. Брахискладка рассекается тектоническим швом северо-северо-западного простирания, оперяющим Амандракский глубинный разлом. Свита сложена метаморфизованными до эпидот-амфиболитовой фации песчаниками, алевролитами, аргиллитами, подвергшимися воздействию гидротермального метасоматизма пропилит-березитового типа. Рудовмещающие метасоматиты содержат многочисленные сульфидно-кварцевые прожилки и сульфидную вкрапленность пирита, пирротина, арсенопирита и других минералов, встречающихся гораздо реже. Рудная залежь оконтурена по данным непрерывного опробования и прослежена вдоль разлома на расстояние 1800 м, имеет максимальную мощность около разлома до 140 м. Залежь полого погружается на запад, постепенно выклиниваясь. Ее протяженность по падению достигает 500 м.

При детальном изучении 4 литологических разрезов (БЛ 7, 8а, 19, 30) не установлено взаимосвязи в распределении золота и литологических разностей пород.

Методика исследования

В основу исследования положены результаты опробования керна колонковых разведочных скважин, пробуренных на месторождении по сети 50×50 м.

Опробование керна разведочных скважин проведено с целью определения содержания золота и его элементов-спутников. Содержание золота в керновых пробах определено пробирным и атомно-абсорбционным методами анализа, а элементов-спутников золоторудной минерализации в сколовых пробах – эмиссионным спектральным приближенно количественным соответствием. Длина секций в среднем составляла один метр при керновом и три метра при сколовом опробовании.

Геохимические пробы анализировались на Ba, Be, Zr, Mn, Ti, V, Cr, Ni, Co, Cu, Pb, Zn, Sn, Mo, Li, Sr, Ag, As, Y, P, B. Элементы La, Nb, Sb, W, Bi, Yb, Tl в связи с низкой чувствительностью анализа не были обнаружены, либо вариации их содержаний характеризуются одним–двумя значениями, что не позволяет использовать их при статистической обработке геохимических данных. Секционные сколовые пробы также анализировались на содержание золота химико-спектральным анализом, чувствительность метода 0,01 г/т.

Для расчета статистических показателей по элементам-спутникам золотого оруденения были использованы анализы 4124 сколовых проб по керну скважин. Фоновые содержания элементов были получены на основе аналитических данных 170 керновых проб из скважин, расположенных за пределами минерализованной зоны.

Результаты исследования и их обсуждение

Содержания основных рудных элементов (золото, мышьяк, серебро, свинец, цинк, медь, кобальт, никель) в первичных ореолах рассеяния изменяются в широких пределах от фоновых до значений в несколько сот раз их превышающих. Это в свою очередь отражается на сложных законах распределения элементов.

Распределение содержания золота на основе результатов кернового опробования дает наглядное представление о характере поведения металла в месторождении (рис. 2). Содержание золота в рудном теле колеблется от $n \times 0,01$ до $n \times 100$ г/т. Центральная часть характеризуется наибольшей мощностью рудного тела наряду с высокими концентрациями благородного металла. Периферия рудной залежи представлена отдельными рудными линзами мощностью до первых метров с самыми низкими содержаниями золота. Пробность золота закономерно возрастает в ряду верхний→средний→нижний уровень оруденения, изменяясь в пределах 744...971 ‰, при среднем значении 852 ‰.

Мышьяк, серебро и свинец образуют высококонтрастные ореолы, проявляющие устойчивую пространственную взаимосвязь с золоторудной минерализацией. Ореол мышьяка, характеризую-

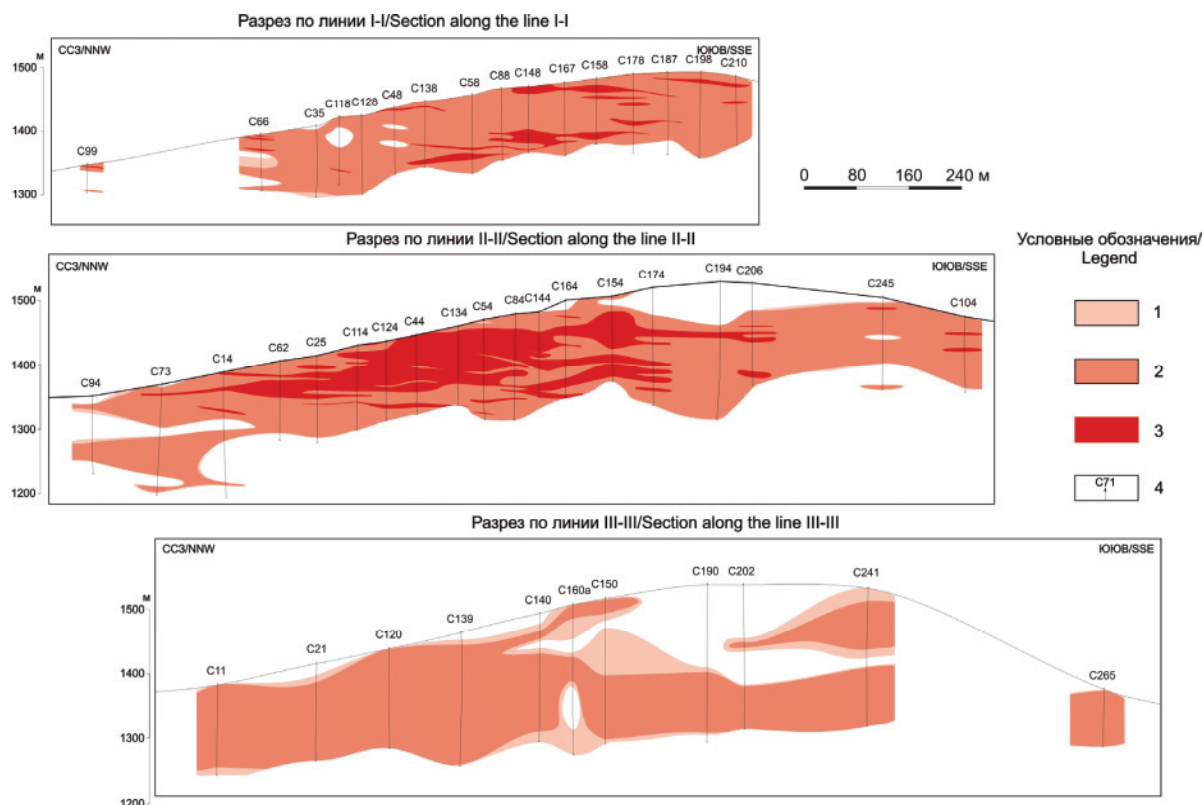


Рис. 2. Распределение золота в рудовещающем метасоматическом ореоле месторождения. 1–3 – содержание золота, г/т: 1 – 0,1>; 2 – 0,1...1; 3 – 1<; 4 – разведочные скважины и их номера

Fig. 2. Gold distribution in the ore-hosting metasomatic aureole of the deposit. 1–3 – gold content, ppm: 1 – 0,1>; 2 – 0,1...1; 3 – 1<; 4 – exploration wells and their numbers

щийся крайне высокими значениями, достигающими первые проценты, в центральной части минерализованной зоны совмещен с высококонтрастными ореолами золота. На периферии рудной зоны ореол мышьяка существенно выходит за ее пределы и не проявляет взаимосвязи с распределением содержания золота. Ореол серебра проявляет неустойчивую пространственную связь с ореолом золота. Аномальные значения серебра преимущественно приурочены к контурам рудной минерализации, достигая значений, превышающих фоновые в сотни раз. Ореол свинца характеризуется неоднородным распределением, находясь как в контурах промышленной минерализации, так и за их пределами.

Основные рудные элементы – золото, мышьяк, серебро, свинец, цинк, медь, кобальт, никель – в объеме минерализованной зоны проявляют устойчивую корреляционную связь между собой. Ag, Pb, Zn характеризуются наибольшей теснотой связи ($r > 0,32$), при $r_{\text{крит.}} = 0,03$ для 5 % уровня значимости. Образующие в пределах месторождения контрастные аномалии Ag и As также обладают высоким значением корреляционной связи между собой – $r = 0,27$. Содержание золота, определенное по сколовым геохимическим пробам химико-спектральным анализом, несмотря на наличие лишь 30 % проб, превышающих порог обнаруже-

ния анализа, проявляет устойчивую взаимосвязь с распределением содержания мышьяка ($r = 0,25$). Тем не менее, в силу целого ряда причин (уровень концентрации, предел обнаружения и др.), результаты определения золота по сколкам и керну скважин, за исключением кластер-анализа переменных, при дальнейших расчётах статистических показателей не использовались.

Энергия рудообразования (ЭР) рассчитывалась по методике, предложенной Н.И. Сафроновым [22]. Внутри минерализованной зоны субфоновые значения показателя до 2 ед. практически отсутствуют. В контуре рудной минерализации значения показателя возрастают до 10^4 ед. и более. В нашем случае аномальные концентрации мышьяка, достигающие 100...2000 коэффициентов концентрации (КК), оказывают существенное влияние на значения показателя энергии рудообразования.

Провести оценку уровня перераспределения вещества в процессе рудообразования можно на основе расчета показателей дисперсии (ДГС) и вариации (ВГС) геохимического спектра [23]. При этом необходимо крайне тщательно подходить к расчёту фоновых содержаний элементов геологических образований.

Фоновые значения ДГС в прилегающем к месторождению пространстве редко превышают 1 ед. В контуре минерализованной зоны значения пока-

зателя резко возрастают до 10^5 ед. и более. Доминирующим элементом при расчете показателя ДГС также является мышьяк, что в свою очередь отражается на прямой взаимосвязи в расположении их ореолов в пространстве. В целом минерализованная зона характеризуется значениями показателя, изменяющимися в широких пределах от 10 до 500 ед.

Фоновые значения показателя ВГС не превышают 40 % и в пределах минерализованной зоны встречаются достаточно редко. В рудных интервалах значения показателя возрастают в разы, достигая 450 %. Наиболее контрастные ореолы ВГС расположены на границе минерализованной зоны, что, по нашему мнению, обусловлено относительно резким изменением химического состава горных пород от минерализованной зоны к вмещающему субстрату.

Как известно, коэффициент вариации рассчитывается с использованием показателя дисперсии, а точнее стандартного отклонения от среднего. Тем не менее, как показано в ряде работ, они несут разную смысловую нагрузку [24]. Несмотря на существенное влияние отдельных рудных элементов на значения показателя, их ореолы, в том числе и на месторождении Чертово Кори́то, не всегда совпадают друг с другом.

Установлено, что на значения показателей ДГС и ВГС существенное влияние оказывают концентрации мышьяка, серебра, свинца. В связи с этим следует обращать особое внимание на спектр эл-

ментов, используемых при расчете данных показателей.

Расчет показателей ДГС и ВГС без высококонтрастных элементов уменьшает значения показателей в несколько раз и сокращает объем их ореолов в пределах минерализованной зоны.

Таким образом, показатели интенсивности процессов рудообразования коррелируют с объемом, занимаемым рудной зоной. Тем не менее без использования дополнительных методов обработки они не позволяют провести интерпретацию АСПП месторождения.

На основе *кластер-анализа* выявлена структура взаимосвязи между элементами. Выделились 4 группы элементов: 1) Au, As, B, Sr, P, Mo; 2) Ag, Zn, Pb; 3) Li, Co, Sn, Cu, Ni, Cr, V, Mn; 4) Ti, Y, Zr, Be, Ba.

Методом К-средних 4124 наблюдения (проб) были разделены на 7 кластеров (таблица). Во всех классах проб, за исключением 4-го, наибольшими концентрациями отличается мышьяк. В первом и втором кластерах преобладают As (до 800 КК), Pb (до 4,9 КК) и Ag (до 3,3 КК), что обусловило их пространственное совмещение с высококонтрастными ореолами золота. Третий кластер проб, также отличающийся высокими концентрациями мышьяка (до 102 КК), в целом тяготеет к периферии рудного тела. Для геохимического спектра четвертого кластера характерна высокая концентрация (в порядке убывания) Ag, Pb, Zn и As. Пробы кластера распространены в пределах рудного тела

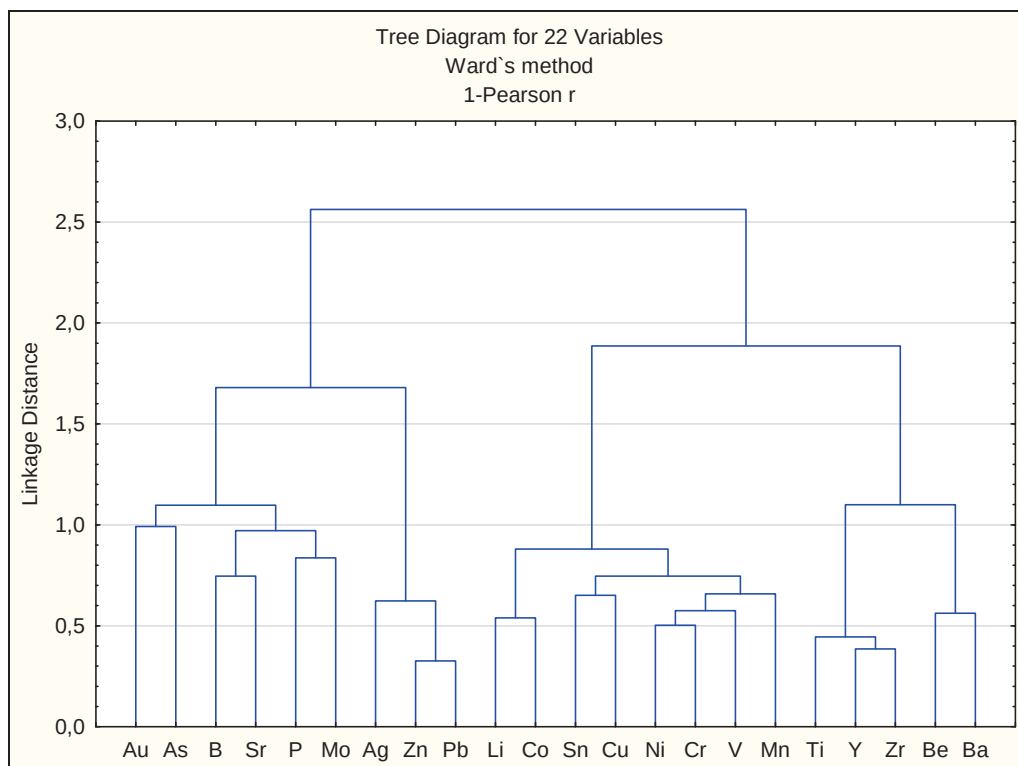


Рис. 3. Результаты кластер-анализа по первичным ореолам рассеяния

Fig. 3. Results of cluster analysis on primary halos of dispersion

и отражают пространственное расположение галенит-халькопирит-сфалеритовой минерализации. Пятый и шестой кластеры характеризуются близкими значениями концентрации элементов, отличающаяся лишь содержанием мышьяка. Тем не менее пробы пятого кластера располагаются за пределами контура рудного тела либо внутри контуров «пустых» прослоев, а пробы, характеризующие геохимический спектр шестого кластера, практически полностью отсутствуют внутри контура рудного тела и характеризуют слабо измененные вмещающие породы. Концентрации элементов седьмого кластера эпизодически появляются как в контуре рудного тела, так и за его пределами и отличаются содержаниями элементов близкими к фоновым, с превышением в 2...3 раза по As и В.

Таблица. Геохимический спектр кластеров в КК

Table. Geochemical spectrum of clusters in CC

Элемент Element	Кластер/Cluster						
	1	2	3	4	5	6	7
Ba	1,01*	1,04	0,99	1,59	1,04	1,04	1,03
Be	1,04	1,06	1,03	1,50	1,03	1,03	1,03
Zr	1,10	0,94	0,89	2,07	0,94	0,88	0,97
Mn	1,13	1,06	1,00	1,02	1,03	1,03	0,97
Ti	0,72	0,66	0,61	1,16	0,66	0,65	0,62
V	0,99	0,90	0,87	1,00	0,88	0,88	0,79
Cr	1,10	1,00	0,96	1,20	1,00	0,96	0,89
Ni	1,40	1,33	1,23	1,67	1,15	1,18	1,06
Co	0,80	0,75	0,70	1,50	0,73	0,72	0,66
Pb	4,89	2,23	1,78	196	2,03	1,81	1,43
Cu	1,12	1,09	1,03	1,10	1,05	1,05	0,97
Zn	1,41	1,34	1,34	25,8	1,22	1,25	1,11
Sn	1,00	0,96	0,95	1,38	0,95	0,96	0,87
Mo	0,95	1,01	1,00	0,70	1,05	1,03	1,02
Li	0,66	0,65	0,65	0,56	0,67	0,65	0,62
Sr	1,20	1,23	1,20	0,96	1,19	1,21	1,19
Ag	3,30	2,59	2,06	307	2,05	2,07	1,22
As	869	294	102	16,5	13,5	40,5	3,35
Y	1,00	0,96	0,97	1,25	0,96	0,93	0,97
P	1,67	1,87	1,66	1,60	1,68	1,69	1,50
B	2,84	2,82	2,85	1,81	2,43	2,51	2,36

* – нормирование содержания элементов проведено на фоновые в месторождении.

* – element content is normalized to the background ones in the deposit.

Выявленные в кластерах ассоциации элементов позволили провести разделение проб на «породные» (5–7 кластеры) и «рудные» (1–4 кластеры). По результатам кластер-анализа установлено зональное строение геохимического ореола месторождения, выразившееся в изменении геохимического спектра пород и руд от крайне неоднородного в центральной зоне (As до 800 КК, Pb до 4,9 КК, Ag до 3,3 КК) вплоть до фоновых значений концентрации элементов во фронтальной.

Для уточнения ассоциаций элементов и расфировки АСПГ был проведен факторный анализ. Было выделено три ассоциации элементов, суммарный вклад которых в общую дисперсию составляет 43 %. Геометризация значений факторов проиллюстрирована на примере разведочной линии БЛ 15 (рис. 4).

Ассоциация элементов Ba, Be, Zr, Ti, Y характерна для фронтальной зоны гидротермально-метасоматического ореола и отражает процесс выноса элементов из его центральной зоны на периферию в процессе березитизации.

Распределение значений первого фактора обусловлено привнесом в метасоматический ореол Cr, Ni, Co, Cu, Mn, V, Sn, P на этапе завершения березитизации и их вытеснением из центральной зоны в последующие стадии рудоотложения. По данным минералого-геохимического картирования, As концентрируется в ядерной зоне в форме арсениопирита. Ассоциация Pb, Zn, Ag связана с образованием наиболее позднего продуктивного полиметаллического минерального комплекса.

На основе статистической обработки геохимических данных с использованием данных минералого-геохимического картирования составлена обобщенная модель геохимической зональности месторождения (рис. 5).

Установленные геохимические ассоциации согласуются со схемой стадийности минералообразования [18].

Ранняя Ba-Be-Zr-Ti-Y ассоциация элементов, выщелоченных и переотложенных в процессе кислотного метасоматоза (кварц-рутил-пирит-пирро-

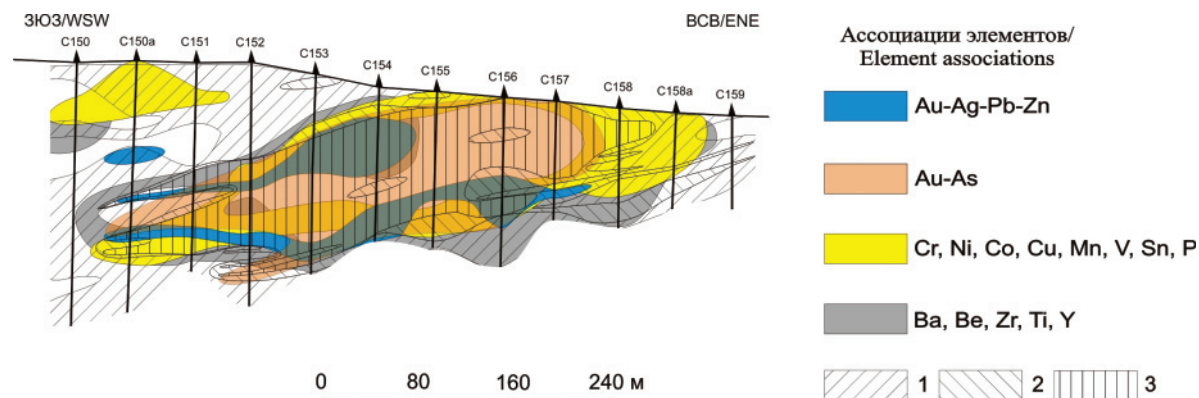


Рис. 4. Распределение геохимических ассоциаций на основе факторного анализа. Содержание золота, г/т: 1 – 0,1>; 2 – 0,1...1; 3 – 1<

Fig. 4. Distribution of geochemical associations of elements based on factor analysis. Gold content, ppm: 1 – 0,1>; 2 – 0,1...1; 3 – 1<

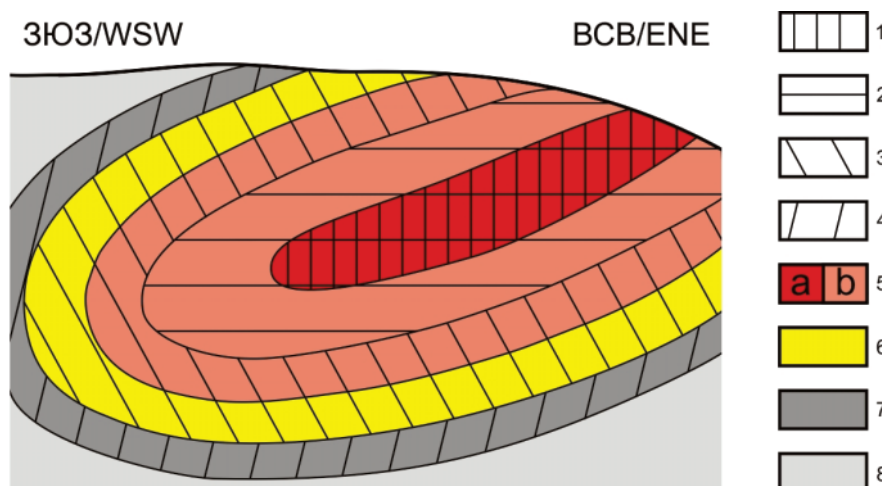


Рис. 5. Обобщенная модель геохимической зональности месторождения Чертово Кoryто. 1–4 – минеральные комплексы/геохимические ассоциации от поздних к ранним: 1 – кварц-полиметаллический с золотом/Au-Ag-Pb-Zn-Cu; 2 – кварц-пирит-арсенопиритовый с золотом/Au-As; 3 – кварц-пирит-арсенопирит-пирротитовый/Cr-Ni-Co-Mn-V-Sn-P-(As); 4 – кварц-рутил-пирит-пирротитовый/Ba-Be-Zr-Ti-Y; 5–7 – зоны метасоматического ореола: 5 – центральная; подзоны а) полиметаллическая; б) мышьяковая; 6 – промежуточная; 7 – фронтальная; 8 – вмещающие породы

Fig. 5. Generalized model of geochemical zonation of the Chertovo Koryto deposit. 1–4 – mineral complexes/geochemical associations from late to early: 1 – quartz-polymetallic with gold/Au-Ag-Pb-Zn-Cu; 2 – quartz-pyrite-arsenopyrite with gold/Au-As; 3 – quartz-pyrite-arsenopyrite-pyrrhotite/Cr-Ni-Co-Mn-V-Sn-P-(As); 4 – quartz-rutile-apatite-pyrite-pyrrhotite/Ba-Be-Zr-Ti-Y; 5–7 – zones of metasomatic halo: 5 – central; subzones a) polymetallic; b) arsenic; 6 – intermediate; 7 – front; 8 – host rocks

тиновый комплекс), окаймляет периферию минерализованной зоны. В промежуточной зоне метасоматического ореола распространена Cr-Ni-Co-Mn-V-Sn-P-(As) геохимическая ассоциация, обусловленная образованием кварц-пирит-арсенопирит-пирротитового комплекса, завершающего безрезитизацию. Отложение Au-As ассоциации происходило в более позднее время, с образованием арсенопирита в составе кварц-пирит-арсенопиритового с золотом минерального комплекса. Пространственное совмещение ореола мышьяка и золоторудной минерализации нарушается в краевых частях месторождения, в связи с чем использование мышьяка в качестве элемента-индикатора, в отдельных случаях, представляется затруднительным. Наиболее поздняя ассоциация Au-Ag-Pb-Zn-Cu полиметаллической с золотом стадии рудообразования (золото, галенит, сфалерит, халькопирит) приурочена к центральной части метасоматически измененных пород. Схожая картина геохимической зональности наблюдается и в других месторождениях [6, 25–28].

Характер распределения геохимических ассоциаций элементов позволил сделать вывод о концентрически-зональном строении геохимического поля месторождения, что выражено в закономерной смене последовательно формирующихся геохимических ассоциаций элементов и зон гидротермально-метасоматического ореола (от периферии к центру): Ba-Be-Zr-Ti-Y/фронтальная, Cr-Ni-Co-Mn-V-Sn-P-(As)/промежуточная, Au-As и Au-Ag-Pb-Zn-Cu/центральная.

Выводы

Статистические параметры распределения элементов в первичных ореолах рассеяния месторождения Чертово Кoryто свидетельствуют об интенсивных гидротермально-метасоматических процессах, выразившихся в первую очередь в отложении высококонцентрированных растворов, содержащих Au, As, Ag, Pb.

В пределах месторождения среди элементов-спутников золотого оруденения наиболее контрастно распределено содержание As. Его первичный ореол существенно выходит за пределы контуров промышленного оруденения. Очевидно, это связано с процессами отложения ранних слабо золотоносных и более поздних высококонцентрированных золотоносных мышьяковистых растворов.

Основные рудные элементы – золото, мышьяк, серебро, свинец, цинк, медь, кобальт, никель – в объеме минерализованной зоны проявляют устойчивую корреляционную связь между собой.

Количественные показатели, отражающие интенсивность эпигенетических преобразований: энергия рудообразования, дисперсия и вариация геохимического спектра, выявляют объем, занимаемый рудной зоной.

С использованием кластер-анализа элементы объединились в следующие группы: 1) Au, As, B, Sr, P, Mo; 2) Ag, Zn, Pb; 3) Li, Co, Sn, Cu, Ni, Cr, V, Mn; 4) Ti, Y, Zr, Be, Ba. Методом К-средних проведено разделение проб на «породные» (5–7 кластеры) и «рудные» (1–4 кластеры), а также установлено зональное строение геохимического ореола месторождения.

Факторным анализом выделены Ba-Be-Zr-Ti-Y, Cr-Ni-Co-Cu-Mn-V-Sn-P и Ag-Pb-Zn геохимические ассоциации. Установленные ассоциации элементов согласуются со стадиями гидротермально-метасоматического минералообразования [18].

На основе созданной модели геохимической зональности установлено концентрически-зональное строение аномальной структуры геохимического поля месторождения. Ранняя Ba-Be-Zr-Ti-Y ассоциация элементов образуется в процессе их выщелачивания и переотложения на стадии кислотного метасоматоза и обрамляет крупнообъемный метасоматический ореол. Cr-Ni-Co-Cu-Mn-V-Sn-P(As) ассоциация элементов, образующаяся по завершении процесса березитизации, распространена в промежуточной зоне метасоматически измененных пород. Геохимические ассоциации продуктивных стадий оруденения Au-As и Au-Ag-Pb-Zn-Cu

занимают центральную часть метасоматического ореола.

Примененный комплекс методов обработки геохимической информации совместно с использованием данных минералого-геохимического картирования [18] обеспечил расшифровку аномальной структуры геохимического поля золоторудного месторождения Чертово Кoryто.

Установленную геохимическую зональность можно использовать на ранних стадиях геологоразведочного процесса как по первичным геохимическим ореолам, в том числе единичным горным выработкам и скважинам, так и по вторичным ореолам, с поправкой на подвижность элементов в процессе гипергенеза.

Автор признателен В.Г. Ворошилову за ценные замечания и предложения, позволившие улучшить содержание статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kristiansson K., Malmqvist L. Trace elements in the geogas and their relation to bedrock composition // *Geoexploration*. – 1987. – V. 24. – P. 517–534.
2. Kristiansson K., Malmqvist L., Persson W. Geogas prospecting: a new tool in the search for concealed mineralizations // *Endeavour*. – 1990. – V. 14. – № 1. – P. 28–33.
3. Nanoscale metals in Earthgas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant deposits in overburden terrains / X. Wang, Z. Cheng, Y. Lu, L. Xu, X. Xie // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1997. – V. 58. – № 1 SPEC. – P. 63–72.
4. Григоров С.А. Генезис и динамика формирования Наталкинского золоторудного месторождения по данным системного анализа геохимического поля // *Руды и металлы*. – 2006. – № 3. – С. 44–48.
5. Григоров С.А. Основы структурной интерпретации геохимических полей рудных объектов для целей их локализации и оценки // *Отечественная геология*. – 2007. – № 4. – С. 45–52.
6. Ворошилов В.Г. Аномальные структуры геохимических полей гидротермальных месторождений золота: механизм формирования, методика геометризации, типовые модели, прогноз масштабов оруденения // *Геология рудных месторождений*. – 2009. – Т. 51. – С. 3–19.
7. TEM study of geogas-transported nanoparticles from the Fankou lead-zinc deposit, Guangdong Province, South China / X. Wei, J. Cao, R.F. Holub, P.K. Hopke, S. Zhao // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2013. – V. 128. – P. 124–135.
8. Metal migration at the North Miitel Ni sulphide deposit in the southern Yilgarn Craton: P. 3. Gas and overview / R.R.P. Noble, M.J. Lintern, B. Townley, R.R. Anand, D.G. Gray, N. Reid // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2013. – V. 13. – № 2. – P. 99–113.
9. Иванов А.И. Особенности применения традиционных методов поисков месторождений рудного золота в сложных горно-таежных ландшафтах // *Отечественная геология*. – 2013. – № 6. – С. 12–20.
10. Chemical diagenesis in near-surface zone above oil fields in geochemical exploration / I.S. Sobolev, N.P. Bredikhin, T. Bratec, A.Y. Falk, O.S. Tolkachev, L.P. Rikhvanov, P.A. Tishin // *Applied Geochemistry*. – 2018. – V. 95. – P. 33–44.
11. Variance-Correlation analysis in the exploration of hydrothermal (fluidogenous) deposits using surface gamma-ray spectrometry / I.S. Sobolev, A.N. Orekhov, T. Bratec, L.P. Rikhvanov, N.P. Soboleva // *Journal of Applied Geophysics*. – 2018. – V. 159. – P. 597–604.
12. Синкина Е.А., Гаврилов Р.Ю. Объемная модель пирротиновой минерализации золоторудного месторождения Чертово Кoryто, Патомское нагорье // *Руды и металлы*. – 2018. – № 1. – С. 54–63.
13. Иванов А.И. Опыт прогнозирования, поисков и оценки новых золоторудных месторождений в Бодайбинском рудном районе // *Отечественная геология*. – 2008. – № 6. – С. 11–16.
14. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. – М.: Недра, 1983. – 191 с.
15. Петролого-геохимические черты рудовмещающего метасоматического ореола золоторудного месторождения Чертово Кoryто (Патомское нагорье) / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2008. – Т. 312. – № 1. – С. 11–20.
16. Структурно-динамическая модель золоторудных месторождений, образованных в несланцевом и черносланцевом субстрате. Ч. 2. Месторождение Чертово Кoryто (Патомское нагорье) / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2009. – Т. 314. – № 1. – С. 23–38.
17. Объемная геолого-геохимическая модель мезотермального золоторудного месторождения Чертово Кoryто (Патомское нагорье) / Р.Ю. Гаврилов, И.В. Кучеренко, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 30–43.
18. Вагина (Синкина) Е.А. Минеральные комплексы руд и генезис золоторудного месторождения Чертово Кoryто (Патомское нагорье) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 63–69.
19. Sinkina E.A., Savinova O.V., Nepryakhina O.B. Geology, mineralogy and fluid inclusion studies of the Chertovo Koryto deposit, North Transbaikalia, Russia // *Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining: 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2016*. – Albena, Bulgaria, 30 June 2016 – 6 July 2016. Code 124231.
20. Peculiarities of pyrrhotite mineralization in the Chertovo Koryto deposit (Patom Uplands) / E.A. Sinkina, O.V. Savinova, O.B. Nepryakhina, Yu.V. Kolbysheva // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2016. – V. 43. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012011.
21. Reflectivity and microhardness of sulfide minerals as genetic information source (case study: Pyrite and arsenopyrite) / E.A. Sinkina, M.V. Korovkin, O.V. Savinova, A.A. Makarova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2016. – V. 33. DOI: 10.1088/1755-1315/33/1/012053.

22. Сафронов Н.И., Мещеряков С.С., Иванов Н.П. Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых / под общ. ред. Н.И. Марочкина. – Л.: Недра, 1978. – 215 с.
23. Выборов С.Г., Быстров И.И. Опыт использования комплексного показателя нарушенности геохимического поля для прогнозирования оруденения // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 1990. – № 4. – С. 102–110.
24. Поцелуев А.А., Быстров И.И., Гаврилов Р.Ю. Показатели дисперсии и вариации геохимического спектра как критерии неоднородности геохимического поля // Прикладная геохимия: Сб. ст.: Прогноз и поиски. – М.: ИМГРЭ, 2002. – Вып. 3. – С. 419–428.
25. Плющев Е.В., Шатов В.В. Геохимия и рудоносность гидротермально-метасоматических образований. – Л.: Недра, 1985. – 247 с.
26. Чекваидзе В.Б., Милев С.А. Эндогенные ореолы сидерофильных элементов золоторудных месторождений // Руды и металлы. – 2009. – № 6. – С. 15–20.
27. Application of Multivariate Statistical Delineation of Prospective Geochemical Providenskaya Area (Chukotka, Russia) / M. Kirillova, V. Voroshilov, A. Yankovich, E. Yankovich, A. Maskov, A. Chernyshov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016 – V. 43. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012012.
28. Identification of geochemical anomalies of the porphyry-Cu deposits using concentration gradient modelling: A case study, Jebel-Barez area, Iran / M. Ziaei, S. Safari, T. Timkin, V. Voroshilov, T. Yakich // Journal of Geochemical Exploration. – 2019. – V. 199. – P. 16–30.

Поступила 18.02.2019 г.

Информация об авторах

Гаврилов Р.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDK 553.411.071:550.4

ANOMALOUS GEOCHEMICAL FIELD OF THE CHERTOVO KORYTO GOLD DEPOSIT (LENSKY ORE DISTRICT)

Roman Yu. Gavrilov,

GavrilovRY@tpu.ru

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

The relevance of the study is caused by the need to improve the efficiency of forecasting and prospecting for ore gold based on geochemical data.

The aim of the research is to develop a model of the anomalous structure of the geochemical field of the Chertovo Koryto deposit in order to identify additional predictive and search criteria for gold ore objects in carbon-carbonate-terrigenous strata.

Methods: statistical processing of geochemical data, geochemical modeling.

Object: the primary geochemical aureole of the Chertovo Koryto gold deposit.

Results. Statistical parameters of distribution of metals in a large-scale metasomatic aureole indicate intense hydrothermal-metasomatic processes, expressed, primarily, in deposition of highly concentrated solutions containing Au, As, Ag, Pb. Based on the processing of geochemical data on primary dispersion halos, a model of the geochemical zonality of the Chertovo Koryto gold deposit was created. The authors have established concentric-zonal composition of the anomalous structure of the deposit geochemical field. The early Ba-Be-Zr-Ti-Y association of elements leached and redeveloped during acid metasomatism (a quartz-rutile-pyrite-pyrrhotite complex) borders the periphery of the mineralized zone. In the intermediate zone of the metasomatic halo, the Cr-Ni-Co-Mn-V-Sn-P-(As) geochemical association is common, due to the formation of the quartz-pyrite-arsenopyrite-pyrrhotite complex completing the beresitization. The deposition of the Au-As association occurred at later time, with the formation of arsenopyrite in the composition of quartz-pyrite-arsenopyrite with the gold mineral complex. The latest association of the Au-Ag-Pb-Zn-Cu polymetallic with gold ore formation stage (gold, galena, sphalerite, chalcopyrite) is confined to the central part of metasomatically modified rocks. The complex of methods for processing geochemical information together with the use of the data of mineralogical and geochemical mapping provided the interpretation of the anomalous structure of the deposit geochemical field. The results obtained made it possible to supplement the existing understanding of the anomalous structure of the geochemical field of the Chertovo Koryto gold deposit.

Key words:

Gold, Lensky ore district, anomalous structure of the geochemical field, geochemical zonality, mathematical statistics.

The author is grateful to V.G. Voroshilov for valuable comments and suggestions to improve the content of the article.

REFERENCES

- Kristiansson K., Malmqvist L. Trace elements in the geogas and their relation to bedrock composition. *Geoexploration*, 1987, vol. 24, pp. 517–534.
- Kristiansson K., Malmqvist L., Persson W. Geogas prospecting: a new tool in the search for concealed mineralizations. *Endeavour*, 1990, vol. 14, no. 1, pp. 28–33.
- Wang X., Cheng Z., Lu Y., Xu L., Xie X. Nanoscale metals in Earthgas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant deposits in overburden terrains. *Journal of Geochemical Exploration*, 1997, vol. 58, no. 1 SPEC, pp. 63–72.
- Grigorov S.A. Genezis i dinamika formirovaniya Natalkinskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya po dannym sistemnogo analiza geokhimicheskogo polya [Genesis and dynamics of formation of the Natalkinsky gold field according to the system analysis of a geochemical field]. *Rudy i metally*, 2006, no. 3, pp. 44–48.
- Grigorov S.A. Fundamentals of structural interpretation of ore object geochemical fields for their localization and evaluation]. *Domestic geology*, 2007, vol. 4, pp. 45–52. In Rus.
- Voroshilov V.G. Anomálne struktury geokhimicheskikh poley gidrotermalnykh mestorozhdeniy zolota: mekhanizm formirovaniya, metodika geometrizatsii, tipovye modeli, prognoz masshtabnosti orudneniya [Anomalous structures of geochemical fields of hydrothermal gold deposits: formation mechanism, methods of geometrization, typical models, and forecasting of ore mineralization]. *Geology of ore deposit*, 2009, vol. 51, no. 1, pp. 3–19.
- Wei X., Cao J., Holub R.F., Hopke P.K., Zhao S. TEM study of geogas-transported nanoparticles from the Fankou lead-zinc deposit, Guangdong Province, South China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, vol. 128, pp. 124–135.
- Noble R.R.P., Lintern M.J., Townley B., Anand R.R., Gray D.G., Reid N. Metal migration at the North Miitel Ni sulphide deposit in the southern Yilgarn Craton: Part 3, gas and overview. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 99–113.
- Ivanov A.I. Features of the application of traditional methods of prospecting ore gold deposits in complex mining and taiga landscapes. *Domestic geology*, 2013, no. 6, pp. 12–20. In Rus.
- Sobolev I.S., Bredikhin N.P., Bratec T., Falk A.Y., Tolkachev O.S., Rikhvanov L.P., Tishin P.A. Chemical diagenesis in near-surface zone above oil fields in geochemical exploration. *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 95, pp. 33–44.
- Sobolev I.S., Orekhov A.N., Bratec T., Rikhvanov L.P., Soboleva N.P. Variance – Correlation analysis in the exploration of hydrothermal (fluidogenous) deposits using surface gamma-ray spectrometry. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, vol. 159, pp. 597–604.
- Sinkina E.A., Gavrilov R.Yu. Obemnaya model pirrotinovykh mineralizatsii zolotorudnogo mestorozhdeniya Chertovo Koryto, Patomskoe nagore [Volumetric model of pyrrhotite mineralization in the Chertovo Koryto gold deposit, Patom upland]. *Rudy i metally*, 2018, no. 1, pp. 54–63.
- Ivanov A.I. Experience in forecasting, prospecting and evaluating new gold deposits in the Bodaibo ore district. *Domestic geology*, 2008, no. 6, pp. 11–16. In Rus.
- Instruktsiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [Instructions for geochemical methods of ore deposit exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 191 p.

15. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Petro-geochemical characteristics of ore-hosting mesotomatic halo of Chertovo Koryto gold-ore deposit (the Patom upland). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 1, pp. 11–20. In Rus.
16. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Structural-dynamic model of gold deposits formed in the non-shale and black shale substrate. Part 2. Field Chertovo Koryto (Patom upland). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 1, pp. 23–38. In Rus.
17. Gavrilov R.Yu., Kucherenko I.V., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. 3D geologic-geochemical model of mesothermal Chertovo Koryto gold-ore deposit (The Patom upland). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 1, pp. 30–43. In Rus.
18. Vagina (Sinkina) E.A. Mineral ore complexes and genesis of gold deposit Chertovo Koryto (Patom upland). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 63–69. In Rus.
19. Sinkina E.A., Savinova O.V., Nepryakhina O.B. Geology, mineralogy and fluid inclusion studies of the Chertovo Koryto deposit, North Transbaikalia, Russia. *Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining: 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2016*. Albena, Bulgaria, 30 June 2016 – 6 July 2016; Code 124231.
20. Sinkina E.A., Savinova O.V., Nepryakhina O.B., Kolbysheva Yu.V. Peculiarities of pyrrhotite mineralization in the Chertovo Koryto deposit (Patom Uplands). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012011.
21. Sinkina E.A., Korovkin, M.V., Savinova, O.V., Makarova, A.A. Reflectivity and microhardness of sulfide minerals as genetic information source (case study: Pyrite and arsenopyrite). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33. DOI: 10.1088/1755-1315/33/1/012053.
22. Safronov N.I., Meshcheryakov S.S., Ivanov N.P. *Energiya rudoobrazovaniya i poiski poleznykh iskopaemykh* [Energy of mineralization and mineral exploration]. Ed. by N.I. Marochkina. Leningrad, Nedra Publ., 1978. 215 p.
23. Vyborov S.G., Bystrov I.I. Opyt ispolzovaniya kompleksnogo pokazatelya narushennosti geokhimicheskogo polya dlya prognozirovaniya orudneniya [Experience in using composite indicator of fracturing geochemical field to predict mineralization]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 1990, no. 4, pp. 102–110.
24. Potseluev A.A., Bystrov I.I., Gavrilov R.Yu. Pokazately dispersii i variatsii geokhimicheskogo spektra kak kriterii neodnorodnosti geokhimicheskogo polya [Dispersion indicators and variations of the geochemical spectrum as criteria for heterogeneity of the geochemical field]. *Applied Geochemistry: Sat. Art.: Forecast and searches*. Moscow, IMGRE, 2002. Vol. 3, pp. 419–428.
25. Plyushchev E.V., Shatov V.V. *Geokhimiya i rudonosnost gidrotermalno-metasomaticheskikh obrazovaniy* [Geochemistry and ore potential of hydrothermal-metasomatic formations]. Leningrad, Nedra Publ., 1985. 215 p.
26. Chekvaidze V.B., Milyaev S.A. Endogennye oreoly siderofilnykh elementov zolotorudnykh mestorozhdeniy [Endogenous halos of siderophilic elements of gold deposits]. *Rudy i metally*, 2009, no. 6, pp. 15–20.
27. Kirillova M., Voroshilov V., Yankovich A., Yankovich E., Maskov A., Chernyshov A. Application of Multivariate Statistical Delineation of Prospective Geochemical Providenskaya Area (Chukotka, Russia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012012.
28. Ziaii M., Safari S., Timkin T., Voroshilov V., Yakich T. Identification of geochemical anomalies of the porphyry-Cu deposits using concentration gradient modelling: a case study, Jebel-Barez area, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, vol. 199, pp. 16–30.

Received: 18 February 2019.

Information about the authors

Roman Yu. Gavrilov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 536.24

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОГО МЕТОДА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Нурпейис Атлант Едилулы,

nurpeiis_atlant@mail.ru

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

Проведено численное моделирование процессов теплопереноса в каскаде термосифонов, представляющих собой систему извлечения геотермальной энергии с больших глубин. Предложена математическая модель теплопереноса в слое теплоносителя на нижней крышке термосифона и паровом канале, отличающихся от известных упрощенным описанием комплекса теплофизических процессов, протекающих в зонах испарения, транспорта и конденсации термосифона. Целью исследования является разработка упрощенного метода расчета температурных полей в каскаде термосифонов, обеспечивающего возможность проведения опытно-конструкторских работ по созданию систем извлечения геотермальной энергии на основе каскада термосифонов. Краевая задача математической физики решалась методом конечных разностей. Показана возможность анализа основных характеристик – температур – в рамках модели «эффективной» теплопроводности, коэффициенты переноса которой могут быть определены экспериментально. Установлена возможность переноса теплоты с больших глубин с «эффективностью», достаточной для достижения в системе теплоснабжения температур около 330 К в условиях полной теплоизоляции внешнего контура (поверхностей термосифона). Полученные результаты являются базой для дальнейшего развития моделей и методов анализа процессов извлечения геотермальной энергии с больших глубин с использованием каскада последовательно работающих термосифонов. По результатам полученных теоретических следствий сформулированы основные направления экспериментальных исследований с целью обоснования сделанных по результатам численного анализа выводов. Результаты численного моделирования дают основания для вывода о перспективности дальнейшей (экспериментальной и теоретической) разработки метода извлечения геотермальной энергии с больших глубин залегания грунтовых вод с использованием каскада термосифонов большой высоты.

Ключевые слова:

Геотермальная энергетика, каскад двухфазных термосифонов, математическое моделирование, тепловой поток, теплоперенос, испарение, конденсация, кондукция.

Введение

В связи с тем, что ресурсы гидроэнергетики на планете по существу исчерпаны, тепловые электрические станции (даже самые современные) в процессе своей работы интенсивно загрязняют окружающую среду, а использование атомной энергетики встречает большое сопротивление со стороны граждан многих государств (особенно Европы и Америки), альтернативные (возобновляемые) источники энергии (ВИЭ) привлекают в последние годы все больше внимания [1–3]. Но за последние 20 лет интенсивной работы промышленности многих развитых государств (Германия, Дания, Нидерланды и др.) больших успехов в использовании ветроустановок и солнечных батарей достичь не удалось [3–5]. Вклад этих источников энергии по состоянию на 2015 г. остается незначительным (менее 8 % [3, 6]) как в большой (выработка электричества), так и в малой (выработка в основном теплоты) энергетике [3–6]. Становится все более очевидным, что эти два направления возобновляемой энергетики существенно ограничены по своему потенциалу в связи с объективными условиями (географическим положением, в основном). В этой связи наиболее привлекательными после двадцати лет интенсивных исследований и разработок в области ВИЭ становятся биомасса и геотермальная энергия. Ресурсы последних распределены по территориям многих государств более или менее равномерно и могут быть эффективно использованы независимо от времени года или дня.

Следует отметить, что биомасса как источник энергии исследуется многие десятилетия учеными почти всех государств мирового сообщества. Опубликованы тысячи статей по этой тематике, например [7–9]. Можно считать, что основные технологии использования биомассы в энергетике в основном проработаны в плане научно-исследовательских работ.

Много хуже положение дел в геотермальной энергетике. Пока предполагается [10, 11], что нагретая до высоких температур вода должна по трубам подаваться с низких горизонтов (глубина до 1 км) в системы теплоснабжения и после оборота возвращаться в область высоких температур. При такой технологии извлечения геотермальной энергии возникают четыре проблемы, решить которые крайне сложно:

1. Потери энергии при транспорте за счет теплоотвода в окружающую среду (охлаждение нагретой до высоких температур воды). Для минимизации этих потерь необходима эффективная теплоизоляция всей внешней поверхности труб подачи наверх теплоносителя.
2. Большие затраты энергии на подъем теплоносителя на большие высоты при работе насосов. В большинстве реальных ситуаций горячая вода не может сама подняться на поверхность.
3. Выявлено, что геотермальная вода содержит много кислотных соединений, которые очень быстро приводят к коррозии металлов и выходу из строя системы подъема такой воды с низких горизонтов (как трубопроводов, так и насосов).

4. При постоянной длительной эксплуатации таких геотермальных источников высока вероятность их истощения в сроки, недостаточные даже для их окупаемости.

Альтернативой варианта прямого подъема геотермальной воды с больших глубин является схема использования каскада большеразмерных термосифонов для передачи теплоты в систему теплоснабжения. В этом случае нет необходимости использовать насосы для извлечения нагретой до высоких температур воды и нет коррозии трубопроводов. Кроме того, при такой схеме теплопередачи источник энергии («горячая» вода) не уходит из своих горизонтов на поверхность. Соответственно, нет опасности «истощения» источника теплоснабжения. Охлаждение воды в области контакта с нижней крышкой первого в каскаде термосифона компенсируется притоком теплоты вследствие кондукции и конвекции из областей, в которых нет термосифонов.

При реализации предполагаемой схемы необходимо знать температуру на верхней крышке последнего термосифона с учетом термических сопротивлений каждого термосифона каскада (эффективных теплопроводностей парового потока и термических сопротивлений разделяющих термосифоны крышек). Для этого вычисления необходимо решать систему уравнений теплопереноса для каскада термосифонов. Использование моделей [12–15], описывающих полный комплекс теплофизических и гидродинамических процессов в паровом канале термосифона, в слое теплоносителя и пленке конденсата на вертикальных стенках, при решении задачи теплопереноса для каскада термосифонов крайне затруднительно. Поэтому целью исследования является разработка упрощенного метода расчета температурных полей в каскаде термосифонов, обеспечивающего возможность проведения опытно-конструкторских работ по созданию систем извлечения геотермальной энергии на основе каскада термосифонов.

Постановка задачи

Установлено [16, 17], что при моделировании теплофизических процессов в термосифонах для расчета основной характеристики процесса – скорости испарения – достаточно решения задачи теплопереноса в слое теплоносителя на нижней крышке в рамках модели, учитывающей кроме теплопроводности также и термогравитационную конвекцию. В [16, 17] показано, что вклад конвективного механизма значителен даже при температурах конденсата меньше температуры кипения. Но решение задачи, существенно менее сложной по сравнению с постановками [12–15], также требует длительных вычислений при анализе характеристик процессов теплопереноса в каскаде термосифонов. Поэтому предлагается использовать для описания процессов переноса теплоты в слое теплоносителя на нижней крышке уравнение теплопроводности, в котором по аналогии с рядом

других задач (например, [18, 19]) используется «эффективный» коэффициент теплопроводности, учитывающий не только кондукцию, но и конвекцию в соответствии с результатами численного моделирования [16, 17].

Для обоснования такого подхода решена на первом этапе моделирования задача теплопроводности для слоя конденсата на нижней крышке одного термосифона.

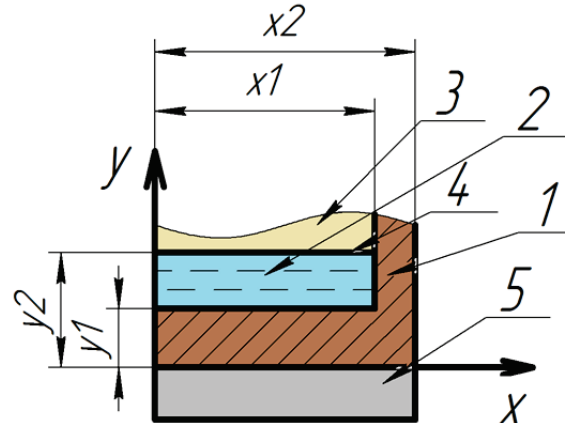


Рис. 1. Область решения: 1 – металлический корпус; 2 – слой конденсата; 3 – паровой канал; 4 – поверхность испарения

Fig. 1. Area of the solution: 1 – metal case; 2 – layers of condensate; 3 – vapor channel; 4 – surface evaporation

Уравнение теплопроводности для нижней крышки:

$$C_{p1}\rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right). \quad (1)$$

Уравнение теплопроводности для слоя конденсата:

$$C_{p2}\rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right). \quad (2)$$

Начальные условия для системы уравнений (1)–(2):

$$t = 0: T(x, y, 0) = T_0. \quad (3)$$

Граничные условия для уравнений (1) и (2) имеют вид:

$$x = 0, \quad 0 < y < y_1: \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

$$x = 0, \quad y_1 < y < y_2: \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0, \quad (5)$$

$$x = x_2, \quad 0 < y < y_2: -\lambda \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0, \quad (6)$$

$$y = 0, \quad 0 < x < x_2: -\lambda \frac{\partial T_1}{\partial y} = q, \quad (7)$$

$$y = y_2, \quad 0 < x < x_1: \lambda \frac{\partial T_2}{\partial y} = Q_e W_e + v_n \rho_n C_{pn} (T_2 - T_0), \quad (8)$$

$$y = y_2, \quad x_1 < x < x_2: -\lambda \frac{\partial T_1}{\partial y} = 0, \quad (9)$$

$$x = x_1, \quad 0 < y < y_2: \begin{cases} T_1 = T_2, \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, \end{cases} \quad (10)$$

$$y = y_1, \quad 0 < x < x_1: \begin{cases} T_1 = T_2, \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, \end{cases} \quad (11)$$

$$W_e = \frac{A(P_{vs} - P_v)}{\sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}}, \quad (12)$$

$$P_{vs} = P_0 \exp\left(-\frac{Q_e M}{RT}\right), \quad P_v = \frac{\rho RT}{M}, \quad (13)$$

где x, y – координаты декартовой системы координат; t – время; T – температура; λ – теплопроводность; ρ – плотность; C_p – теплоемкость; Q_e – теплота испарения; W_e – скорость испарения; q – линейная скорость; q – тепловой поток; A – коэффициент аккомодации; P_{vs} – давление насыщенного пара, P_v – парциальное давление пара над поверхностью жидкости, $R=8314$ Дж/кмоль·К – универсальная газовая постоянная, M – молекулярный вес; 1 – материал крышки, 2 – жидкость, п – пар.

Нелинейная задача (1)–(13) решена методом конечных разностей с использованием итерационной четырехточечной схемы, хорошо проявившей себя при решении нелинейных задач теплопереноса в условиях интенсивных фазовых превращений [20] и химического реагирования [21]. Основные трудности численного решения сформулированной краевой задачи обусловлены локальным стоком тепла на границе раздела фаз (поверхности испарения теплоносителя). Интенсивный отвод теплоты в одной точ-

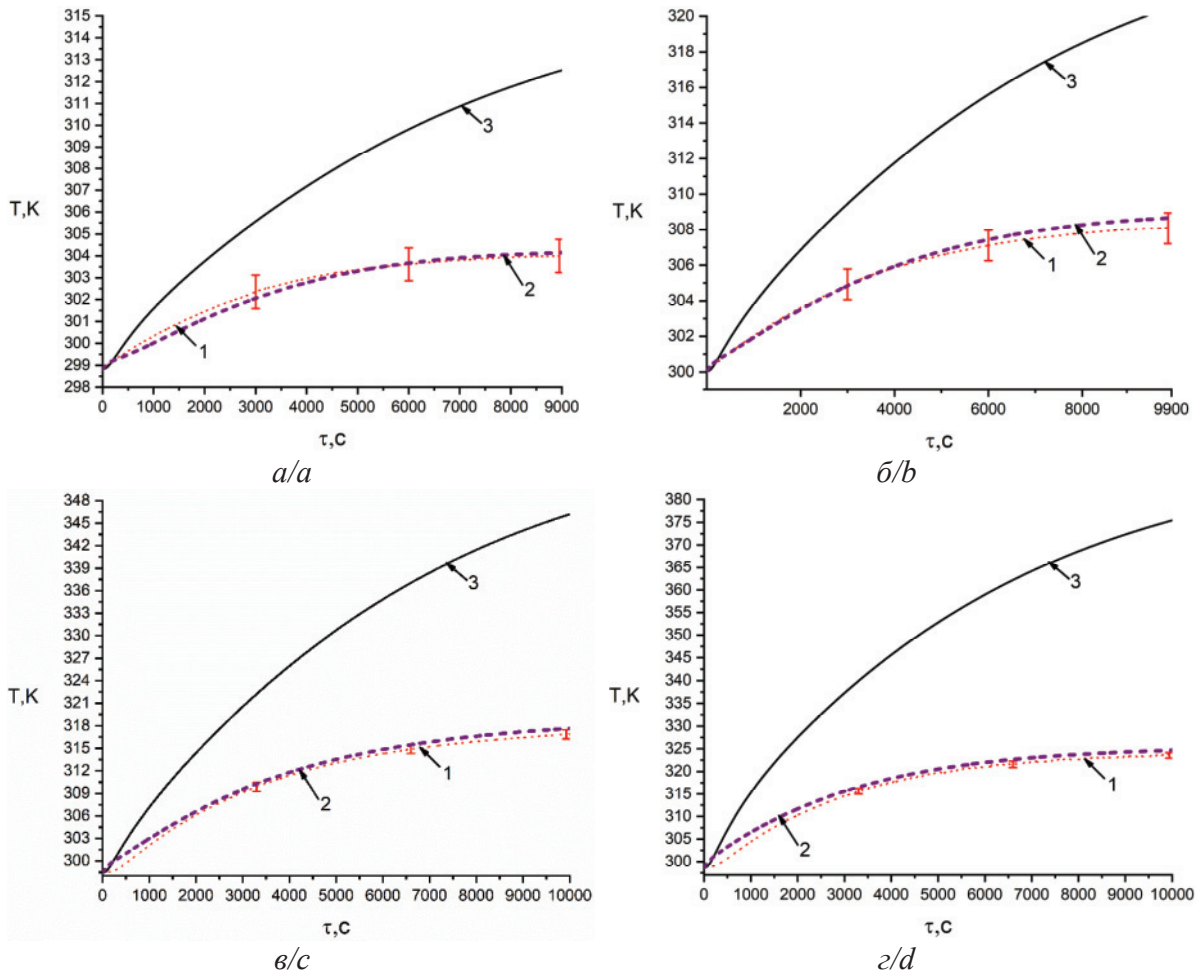


Рис. 2. Зависимости температур в точке $x=0$ мм, $y=6$ мм от времени для слоя теплоносителя: а) $q=0,4$ кВт/м², б) $q=0,5$ кВт/м², в) $q=0,9$ кВт/м², г) $q=1,8$ кВт/м² (1 – эксперимент (---), 2 – численное решение в рамках модели (1)–(13) (···), 3 – численное решение уравнения теплопроводности для слоя теплоносителя (—))

Fig. 2. Temperature dependences at point $x=0$ mm, $y=6$ mm on time for coolant layer: а) $q=0,4$ kW/m², б) $q=0,5$ kW/m², в) $q=0,9$ kW/m², г) $q=1,8$ kW/m² (1 – experiment (---), 2 – numerical solution within the framework of the model (1)–(13) (···), 3 – numerical solution of the heat equation for the coolant layer (—))

ке разностной сетки приводит к большим перепадам температур в приповерхностном слое конденсата. Поэтому задача (1)–(13) решалась с очень малыми шагами по времени (до 0,001 с), что, соответственно, приводило к большой длительности вычислений.

В качестве теплоносителя при проведении численного моделирования была выбрана дистиллированная вода, в связи с тем, что есть достоверные экспериментальные данные по характеристикам этой жидкости и скоростям испарения в зонах изменения температур, соответствующих условиям работы термосифонов [16], также известны [16] температуры в характерных точках слоя этого теплоносителя на нижней крышке термосифона в достаточно широком диапазоне тепловых потоков.

На рис. 2 представлены зависимости температур от времени в точке $x=0$ мм, $y=6$ мм (рис. 1) для слоя теплоносителя при тепловых потоках q от 0,4 до 1,8 кВт/м² (коэффициент эффективной теплопроводности ($\lambda_{эф}$) варьировался от 4,5 до 28 Вт/(м·К)).

Три кривые на рис. 2 соответствуют результатам экспериментов [16], численному моделированию в рамках модели «эффективной» теплопроводности (кривая 2) и результатам вычислений при решении задачи теплопроводности без учета термогравитационной конвекции (кривая 3). Хорошо видна роль конвективного теплопереноса в формировании температурного поля теплоносителя. Результаты решения задачи (1)–(13) в рамках модели «эффективной» теплопроводности хорошо соответствуют экспериментальным данным при значениях $\lambda_{эф}$. С ростом q растет $\lambda_{эф}$ (рис. 3) вследствие интенсификации процесса термогравитационной конвекции. Чем больше q , тем быстрее нагретые до высоких температур нижние слои теплоносителя поднимаются вверх, а относительно холодные верхние слои опускаются вниз – происходит интенсивное перемешивание жидкости при температурах, меньших температуры кипения, такой механизм теплопереноса будет характерен для любого теплоносителя.

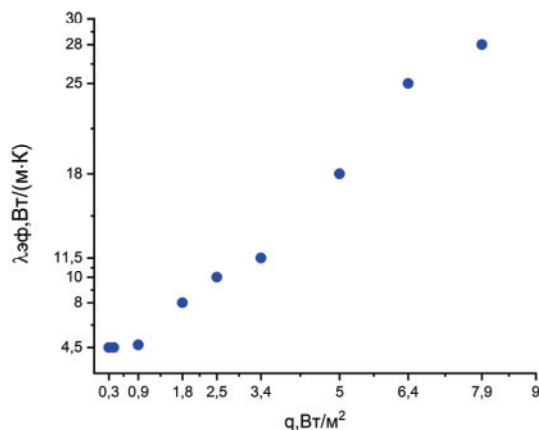


Рис. 3. Зависимость эффективной теплопроводности теплоносителя ($\lambda_{эф}$, Вт/(м·К)) от теплового потока (q , Вт/м²) к нижней крышке термосифона

Fig. 3. Dependence of the effective thermal conductivity of the coolant ($\lambda_{эф}$, W/(m·K)) on the heat flux (q , W/m²) to the bottom cover of the thermosyphon

Результаты решения задачи (1)–(13) были использованы при математическом описании процесса переноса теплоты через каскад термосифонов. Область моделирования приведена на рис. 4. При постановке этой задачи основным допущением было предположение об идеальном контакте нижних и верхних торцевых поверхностей всех термосифонов каскада (кроме нижней границы первого и верхней границы последнего). При решении задачи теплопроводности для системы четырехслойных пластин использовались результаты решения задачи (1)–(13), а также экспериментальные данные по эффективной теплопроводности паровых каналов термосифонов полученные в [16, 17]. Эти характеристики определяются с достаточно высокой достоверностью экспериментально. Следует только отметить, что эффективные теплопроводности паровых каналов термосифонов (в некоторых случаях термические сопротивления) получены для относительно малых по высоте паровых каналов. При решении задач теплопереноса для каскада термосифонов целесообразно провести дополнительные экспериментальные исследования на термосифонах большой высоты для уточнения значений $\lambda_{эф}$.

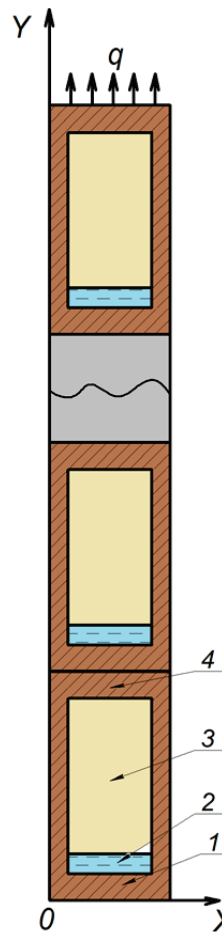


Рис. 4. Область решения: 1 – нижняя крышка; 2 – слой конденсата; 3 – паровой канал; 4 – верхняя крышка

Fig. 4. Area of the solution: 1 – bottom cover; 2 – layer of condensate; 3 – vapor channel; 4 – top cover

Рассматривалась представительная группа (до 40) термосифонов большой высоты (рис. 4). В каждом выделялись четыре зоны существенно разной протяженности (толщины верхней и нижней крышек составляла 3 мм, толщина слоя теплоносителя на нижней крышке 20 мм, высота парового канала 10 м). В рамках принятой физической модели задача теплопереноса в каждом отдельном термосифоне сводится к решению системы четырех уравнений теплопроводности (каждое уравнение описывает теплоперенос в одной из вышеупомянутых зон). На границах между отдельными слоями использованы граничные условия четвертого рода (аналогично, на границах между термосифонами). В такой постановке задача сводится к системе уравнений:

$$C_{pi}\rho_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \quad i=1, \dots, 4 \text{ для каждого термосифона.}$$

На границе $x=0$ (нижняя граница нижней крышки первого термосифона каскада) могут быть заданы граничные условия первого рода:

$$T(0, t) = T_{ист},$$

где $T_{ист}$ – температура «горячей» воды на большой глубине залегания.

На границе между слоями термосифона:

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial y}, \quad T_i = T_{i+1}.$$

На верхней границе верхней крышки последнего термосифона задаются граничные условия третьего рода:

$$\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial y} = \alpha(T_n - T_v),$$

где α – коэффициент теплоотдачи; T_v – температура воды в системе отопления, работающей от геотермального источника.

Результаты решения задачи приведены на рис. 5 в виде распределений температур по высоте каскада (h) термосифонов при варьировании количества от 10 до 100 шт.

Результаты численного моделирования (рис. 5) показывают, что при температуре геотермальной воды 373 К может быть достигнута температура верхней крышки термосифона около 336 К. Такая температуры в системе отопления является приемлемой для достаточно большого числа регионов, например, средней полосы России. Необходимо отметить, что при постановке задачи было принято условие теплоизоляции внешней поверхности всех термосифонов (отсутствие потерь теплоты при ее подъеме с больших глубин). Кроме того, следует

отметить, что полученные результаты иллюстрируют принципиальную возможность использования геотермальной энергии с применением каскада термосифонов.

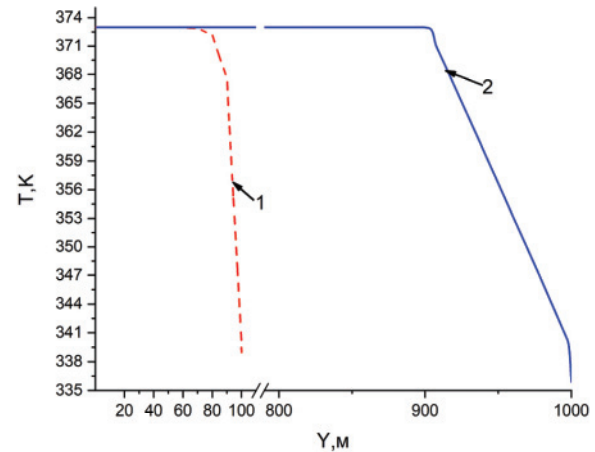


Рис. 5. Распределение температуры по высоте каскада термосифонов при $\tau=100000$ с, $\lambda_{эф.в.}=28$ Вт/(м·К) для хладагента и $\lambda_{эф.п.к.}=600$ Вт/(м·К) для парового канала: 1) $h=100$ м; 2) $h=1000$ м

Fig. 5. Temperature distribution over the height of the cascade of thermosyphons at $\tau=100000$ s, $\lambda_{eff.c.}=28$ W/(m·K) for the refrigerant and $\lambda_{eff.v.c.}=600$ W/(m·K) for the vapor channel: 1) $h=100$ m; 2) $h=1000$ m

Заключение

По результатам численного моделирования процессов теплопереноса в каскаде термосифонов обоснована возможность использования такой системы для извлечения геотермальной энергии с больших глубин при термосифонах большой высоты. Для разработки систем по извлечению геотермальной энергии с помощью каскада термосифонов необходимо проведение комплекса экспериментальных и теоретических исследований с целью обоснования возможности использования основных характеристик работы замкнутых двухфазных термосифонов (в первую очередь эффективной теплопроводности), полученных при относительно малых высотах последних на ТС большой высоты. Сформулированы направления дальнейших исследований по выбору конструктивных и режимных параметров термосифонов.

Исследование проведено в рамках программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета среди ведущих мировых научно-образовательных центров (Госзадание «Наука» 8.13264.2018/8.9, проект ВИУ-ИШЭ-300/2018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carapellucci R., Giordano L. Modeling and optimization of an energy generation island based on renewable technologies and hydrogen storage systems // International Journal of Hydrogen Energy. – 2012. – V. 37. – № 3. – P. 2081–2093.
2. Akyuz E., Oktay Z., Dincer I. Performance investigation of hydrogen production from a hybrid wind-PV system // International Journal of Hydrogen Energy. – 2012. – V. 37. – № 21. – P. 16623–16630.
3. Dynamic compressor optimization in natural gas pipeline systems / T.W.K. Mak, P. Van Hentenryck, A. Zlotnik, R. Bente // INFORMS Journal on Computing. – 2019. – V. 31 (1). – P. 40–65.

4. Petersson A. Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines. Thesis for the degree of licentiate of engineering. – Goteborg, Sweden, 2003. – 122 p.
5. Pagliaro M., Ciriminna R., Palmisano G. Flexible Solar Cells // *ChemSusChem*. – 2008. – V. 1. – Iss. 11. – P. 880–891.
6. Мудрецов А.Ф., Тулупов А.С. Проблемы развития нетрадиционных и возобновляемых источников энергии // *Сборник: Стратегическое планирование и развитие предприятий*. – М.: ЦЭМИ РАН, 2016. – С. 100–103.
7. Syngas production from microwave-assisted air gasification of biomass. P. 1. Model development / C. Ke, Y. Zhang, Y. Gao, Y. Wang, R. Ruan // *Renewable Energy*. – 2019. – V. 140. – P. 772–778.
8. Физико-химические основы процессов образования биомассы и перспективы ее использования в альтернативной энергетике / Ю.Н. Шалимов, А.В. Епифанов, В.И. Кудряш, В.Д. Епифанов, М.В. Лутовац, В.И. Федянин, Е.П. Евсеев, С.А. Соколов, П.Н. Макаров, Г.Я. Власов, Г.С. Веранян // *International Scientific Journal Life and Ecology*. – 2015. – № 2. – С. 27–29.
9. Analysis of feedstock requirement for the expansion of a biomass-fed district heating system considering daily variations in heat demand and biomass quality / O. Quirion-Blais, K.T. Malladi, T. Sowlati, E. Gao, C. Mui // *Energy Conversion and Management*. – 2019. – V. 187. – P. 554–564.
10. Lund J.W., Boyd T.L. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review // *Geothermics*. – 2016. – V. 60. – P. 66–93.
11. Bertani R. Geothermal power generation in the world 2010–2014: Update Report // *Geothermics*. – 2016. – V. 60. – P. 31–43.
12. Kuznetsov G.V., Sitnikov A.E. Numerical analysis of basic regularities of heat and mass transfer in high-temperature heat pipe // *TVT*. – 2002. – V. 40. – Iss. 6. – P. 964–970.
13. Kuznetsov G.V., Al-Ani M.A., Sheremet M.A. Numerical analyses of convective heat transfer in a closed two-phase thermosiphon // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2011. – V. 20 (2). – P. 201–210.
14. Fadhl B., Wrobel L.C., Jouhara H. Numerical modelling of the temperature distribution in a two-phase closed thermosiphon // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – V. 60 – P. 122–131.
15. Numerical study on the two-phase flow pattern and temperature distribution in a loop thermosiphon as a defrost device at the evaporator in the refrigerator / S.H. Park, Y.S. Kim, S.Y. Kim, Y.G. Park, M.Y. Ha // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2018. – V. 32 (12). – P. 5927–5936.
16. Кузнецов Г.В., Нурпейис А.Е. Экспериментальное определение температур в характерных сечениях рабочей зоны замкнутого двухфазного термосифона // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2018. – Т. 20. – № 3–4. – С. 136–144.
17. Безродный М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. – Киев: Факт, 2005. – 704 с.
18. Пиоро И.Л., Антоненко В.А., Пиоро Л.С. Эффективные теплообменники с двухфазными термосифонами. – Киев: Наук. думка, 1991. – 248 с.
19. Nurpeiis A.E., Nemova T.N. The opportunity analyses of using thermosyphons in cooling systems of power transformers on thermal stations // *MATEC Web of Conferences. Heat and mass transfer in the system of thermal modes of energy – Technical and technological equipment*. – Tomsk, April 19–21 2016. – V. 72. – 01077, 7 p.
20. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Numerical investigation of the influence of convection in a mixture of combustion products on the integral characteristics of the evaporation of a finely atomized water drop // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2014. – V. 87. – P. 103–111.
21. Mathematical simulation of thermophysical and thermos chemical processes during combustion of intumescent fire-protective coating / V.L. Strakhov, A.N. Garaschenko, G.V. Kuznetsov, V.P. Rudzinskii // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 2001. – V. 37. – P. 178–186.

Поступила 02.05.2019 г.

Информация об авторах

Нурпейис А.Е., ассистент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 536.24

ANALYSIS OF POTENTIAL METHOD OF GEOTHERMAL ENERGY APPLICATION

Atlant E. Nurpeiis,

nurpeiis_atlant@mail.ru

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

The numerical simulation of heat transfer was conducted in a cascade of thermosyphons representing a system for extracting geothermal energy from great depths. We proposed a mathematical model of heat transfer in the coolant layer on the bottom cover of a thermosyphon and in the vapor channel differing from the well-known ones by a simplified description of the complex of thermophysical processes occurring in the evaporation, transport and condensation zones of the thermosyphon. The aim of this work is to develop a simplified method for calculating temperature fields in a cascade of thermosyphons, which makes it possible to conduct design and experimental work to create the systems for extracting geothermal energy based on a cascade of thermosyphons. The boundary problem of mathematical physics was solved by the method of finite differences. We showed the possibility to analyze the main characteristics – temperatures – within the framework of the model of «effective» thermal conductivity. The transfer coefficients of this model can be determined experimentally. We found the possibility of heat transfer from large depths with «efficiency» sufficient to achieve temperatures of about 330 K in the heat supply system when the external contour (thermosyphon surfaces) is completely thermally insulated. The results obtained are the basis for the further development of models and methods for analyzing geothermal energy extraction from great depths using a cascade of sequentially operating thermosyphons. According to the obtained theoretical results, the main directions of experimental studies were formulated to justify the conclusions made by the results of a numerical analysis. The results of numerical simulation provide grounds for concluding that the future (experimental and theoretical) development of a method for extracting geothermal energy from large depths of groundwater using a cascade of thermosyphons is promising.

Key words:

Geothermal energy, cascade of two-phase thermosyphons, mathematical modeling, heat flow, heat transfer, evaporation, condensation, conduction.

The study was conducted in the framework of the program of increasing the competitiveness of National Research Tomsk Polytechnic University among world's leading research and educational centers (state assignment «Nauka» 8.13264.2018/8.9, project VIU-ISHE-300/2018).

REFERENCES

1. Carapelucci R., Giordano L. Modeling and optimization of an energy generation island based on renewable technologies and hydrogen storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, vol. 37, no. 3, pp. 2081–2093.
2. Akyuz E., Oktay Z., Dincer I. Performance investigation of hydrogen production from a hybrid wind-PV system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, vol. 37, no. 21, pp. 16623–16630.
3. Mak T.W.K., Van Hentenryck P., Zlotnik A., Bente R. Dynamic compressor optimization in natural gas pipeline systems. *INFORMS Journal on Computing*, 2019, vol. 31 (1), pp. 40–65.
4. Petersson A. *Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines*. Thesis for the degree of licentiate of engineering. Goteborg, Sweden, 2003. 122 p.
5. Pagliaro M., Ciriminna R., Palmisano G. Flexible Solar Cells. *ChemSusChem*, 2008, vol. 1, Iss. 11, pp. 880–891.
6. Mudretsov A.F., Tulupov A.S. Problemy razvitiya netraditsionnykh i vozobnovlyayemykh istochnikov energii [Problems of development of non-traditional and renewable energy sources]. *Sbornik: Strategicheskoe planirovanie i razvitie predpriyaty* [Collection: Strategic planning and development of enterprises]. Moscow, TsEMI RAN Publ., 2016. pp. 100–103.
7. Ke C., Zhang Y., Gao Y., Wang Y., Ruan R. Syngas production from microwave-assisted air gasification of biomass: Part 1 model development. *Renewable Energy*, 2019, vol. 140, pp. 772–778.
8. Shalimov Yu.N., Epifanov A.V., Kudryash V.I., Epifanov V.D., Lutovats M.V., Fedyanin V.I., Evseev E.P., Sokolov S.A., Makarov P.N., Vlasov G.Ya., Veranyan G.S. Physico-chemical basis of biomass formation and prospects of its use in alternative energy. *International Scientific Journal Life and Ecology*, 2015, no. 2, pp. 27–29. In Rus.
9. Quirion-Blais O., Malladi K.T., Sowlati T., Gao E., Mui C. Analysis of feedstock requirement for the expansion of a biomass-fed district heating system considering daily variations in heat demand and biomass quality. *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 187, pp. 554–564.
10. Lund J.W., Boyd T.L. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 2016, no. 60, pp. 66–93.
11. Bertani R. Geothermal power generation in the world 2010–2014: Update Report. *Geothermics*, 2016, vol. 60, pp. 31–43.
12. Kuznetsov G.V., Sitnikov A.E. Numerical analysis of basic regularities of heat and mass transfer in high-temperature heat pipe. *TVT*, 2002, vol. 40, Iss. 6, pp. 964–970.
13. Kuznetsov G.V., Al-Ani M.A., Sheremet M.A. Numerical analyses of convective heat transfer in a closed two-phase thermosiphon. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, vol. 20 (2), pp. 201–210.
14. Fadhl B., Wrobel L.C., Jouhara H. Numerical modelling of the temperature distribution in a two-phase closed thermosiphon. *Applied Thermal Engineering*, 2013, vol. 60, pp. 122–131.
15. Park S.H., Kim Y.S., Kim S.Y., Park Y.G., Ha M.Y. Numerical study on the two-phase flow pattern and temperature distribution in a loop thermosyphon as a defrost device at the evaporator in the refrigerator. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, vol. 32 (12), pp. 5927–5936.
16. Kuznetsov G.V., Nurpeiis A.E. Experimental determination of temperatures in characteristic sections of the working zone of a closed two-phase thermosyphon. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*, 2018, vol. 20, no. 3–4, pp. 136–144. In Rus.
17. Bezrodnyy M.K., Pioro I.L., Kostyuk T.O. *Protsesty perenosa v dvukhfaznykh termosifonnykh sistemakh* [Transfer in two-phase thermosyphon systems]. Kiev, Fakt Publ., 2005. 704 p.

18. Pioro I.L., m Antonenko V.A., Pioro L.S. *Effektivnye teploobmeniki s dvukhfaznymi termosifonami* [Efficient heat exchangers with two-phase thermosyphons]. Kiyev, Naukova dumka Publ., 1991. 248 p.
19. Nurpeiis A.E., Nemova T.N. The opportunity analyses of using thermosyphons in cooling systems of power transformers on thermal stations. *MATEC Web of Conferences. Heat and mass transfer in the system of thermal modes of energy – Technical and technological equipment*. Tomsk, 19–21 April 2016. Vol. 72, 01077, 7 p.
20. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Numerical investigation of the influence of convection in a mixture of combustion products on the integral characteristics of the evaporation of a finely atomized water drop. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, pp. 103–111.
21. Strakhov, V.L., Garaschenko, A.N., Kuznetsov, G.V., Rudzinskiy, V.P. Mathematical simulation of thermophysical and thermos chemical processes during combustion of intumescent fire-protective coating. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2001, vol. 37, pp. 178–186.

Received: 2 May 2019.

Information about the authors

Atlant E. Nurpeiis, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.831:622.274

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТОЙЧИВЫХ КАМЕР И ЦЕЛИКОВ В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Харисов Тимур Фаритович¹,
timur-ne@mail.ru

Харисова Ольга Дмитриевна¹,
OlgaZheltysheva@gmail.com

¹ Институт горного дела УрО РАН,
Россия, 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения безопасности на Соколовском подземном руднике, а также повышения полноты и качества выемки руды в сложных горно-геологических условиях – при наличии покрывающей толщи обводненных рыхлых отложений.

Цель: определить оптимальные параметры устойчивых камер и целиков для предотвращения обрушения горных пород и проникновения песчано-глинистых масс в подземные выработки.

Объект: массив горных пород на Северном участке Соколовского месторождения.

Методы. Многовариантное численное моделирование методом конечных элементов в двумерной постановке выполнялось в программе Rocscience RS2, что позволило учесть большое количество факторов, влияющих на состояние массива. При расчетах приняты во внимание не только физико-механические свойства пород и действующие в массиве напряжения, но и структурные характеристики массива, а также степень техногенного воздействия. В качестве модели поведения массива использовалась модель Хоека–Брауна, отличительным преимуществом которой является ее нелинейность. Так как реальный массив характеризуется неоднородностью прочностных свойств и напряженно-деформированного состояния, был выполнен предусмотренный в программном комплексе Rocscience вероятностный анализ, учитывающий изменение граничных условий в установленных интервалах для создаваемой модели.

В результате численного моделирования определено изменение напряженно-деформированного состояния массива, на основании чего вычислены коэффициент устойчивости окружающего массива, величины и направления его смещений, а также установлены зоны распределения вероятности разрушения массива в заданных интервалах граничных условий. Определены параметры камер и целиков, обеспечивающие общую устойчивость, минимизирующие возможность прорыва водогазовых масс в выработки.

Выводы. Сохранение устойчивости кровли подземных камер при отработке очистных рудных блоков на шахте «Соколовская» позволит снизить риск проникновения песчано-глинистых масс в подземные выработки, обеспечивая безопасное и эффективное ведение горных работ, а также повысить полноту и качество выемки руды. Выполненное методом конечных элементов многовариантное численное моделирование влияния очистных выработок на массив позволило определить оптимальные геомеханические параметры камер и целиков, обеспечивающие устойчивость окружающего массива. Применение программного комплекса Rocscience RS2 в результате учета большого количества факторов, влияющих на состояние массива, значительно повышает надежность оценки устойчивости массива.

Ключевые слова:

Подземная разработка, параметры камер и целиков, устойчивость выработок, обрушение горных пород, напряженно-деформированное состояние, модель Хоека–Брауна, метод конечных элементов, численное моделирование, Rocscience RS2, конвергенция выработок.

Введение

Одной из основных задач в горной науке является обеспечение безопасности ведения горных работ при одновременном поддержании эффективности и рентабельности разработки. Особенно данная проблема актуальна для месторождений, находящихся в сложных горно-геологических условиях.

Разработка Северного участка Соколовского месторождения, на котором в настоящее время производится добыча железной руды подземным способом, осложняется неблагоприятной геомеханической ситуацией на подземном руднике. Главным негативным природным фактором, затрудняющим эффективное и безопасное ведение горных работ, является наличие толщи обводненных рыхлых мезокайнозойских отложений, перекрывающей скальную рудоносную зону месторождения и создающей опасность прорыва водогазовых масс в горные выработки.

На первом этапе работы рудника применялась этажно-камерная система разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями, однако и в этих условиях имели место обрушения вмещающих пород, в некоторых случаях – с выходом на дневную поверхность. Сразу же после образования воронок обрушения в них начинался приток подземных вод из олигоценового горизонта, и они заполнялись водой до статического уровня на данном горизонте. Все образовавшиеся на поверхности воронки засыпались скальной породой для предотвращения оплывания их стенок и снижения объема свободной воды.

После 1998 г. на руднике произошел переход на систему разработки с обрушением руды и вмещающих пород. В результате проведения добычных работ на шахтном поле образовалось более 30 воронок обрушения, при этом их засыпка не производилась. Суммарный объем поверхностных

вод, накопившихся во всех открытых воронках, к 2005 г. составил несколько сотен тысяч м³. Тем не менее, до 2005 г. аварийных прорывов воды не происходило, но периодически наблюдались выходы в горные выработки глинисто-песчаных или песчано-глинистых масс с обломками скальных пород.

При дальнейшем развитии горных работ начали появляться вторичные воронки обрушения, образовавшиеся в старых воронках, заполненных поверхностными водами. Три таких повторных выхода сопровождалось кратковременными прорывами поверхностных вод в подземные горные выработки, причем последний – наиболее крупный – имел катастрофические последствия.

Для предотвращения в будущем прорывов поверхностных вод была произведена засыпка всех открытых воронок скальными породами, а на территории зоны обрушения образован отвал из пород, извлеченных из Соколовского карьера [1]. После внедрения этих мер прорывов воды больше не происходило. Однако в настоящее время практически во всех отработанных и отрабатываемых панелях отмечены случаи выхода песчано-глинистых масс (далее – ПГМ) на горизонты выпуска – в дучки и доставочные выработки. Их выход влечет за собой не только засорение руды, но и при больших объемах вышедших ПГМ может приводить к закупориванию дучек и проникновению масс в подготовительно-нарезные выработки, вплоть до полной остановки работ.

В результате в недоступных более блоках остаются огромные потери руды, а также возрастает объем дополнительных подготовительно-нарезных работ, необходимых для доступа к оставшимся частям рудного блока.

Для снижения рисков проникновения ПГМ в выработки было предложено перейти от одностадийной технологии отработки очистных рудных блоков – системы этажного принудительного обрушения со сплошной выемкой руды под обрушенными породами, используемой в настоящее время на руднике, на двухстадийную технологию – систему разработки этажным принудительным обрушением с вертикальными компенсационными камерами. При данной системе первоначально часть запасов блока вынимают в виде камер, а затем на образовавшееся компенсационное пространство обрушают оставшуюся часть блока путем разрушения межкамерных и межблочных целиков. Затем осуществляют донный выпуск взорванной руды под налегающими обрушенными породами.

Главным преимуществом данной системы разработки является возможность выемки большего процента чистой руды из камер, чем под обрушенными породами. Недостатком данной системы является наличие риска возникновения внезапного и неконтролируемого самообрушения компенсационных камер, что чревато нарушениями целостности массива и опасностью воздушных ударов. Однако высокая трещиноватость и сравнительно низ-

кая устойчивость рудного массива Соколовского рудника уменьшает вероятность возникновения воздушных ударов, поскольку возможные самообрушения в камерах с большой вероятностью будут развиваться постепенно: с вывалами более мелких породных блоков, чем в низкотрещиноватых массивах. При этом участок возникновения самообрушения в камере можно использовать в качестве индикатора местоположения возможного прорыва ПГМ.

Объект и методы исследований

Северный участок, как и все Соколовское месторождение в целом, сложен двумя комплексами горных пород: палеозойским, представленным сложно дислоцированными эффузивно-осадочными породами нижнего карбона, и вышележащим мезокайнозойским. Верхний комплекс пород сложен горизонтально залегающими осадочными породами, представленными песчано-глинистыми отложениями мезокайнозойского возраста, средней мощностью 115 м. Наличие данной водоносной песчано-глинистой толщи, перекрывающей скальную рудоносную зону месторождения, и является главным негативным природным фактором, затрудняющим эффективное и безопасное ведение горных работ.

Отрабатываемый в настоящее время рудный блок на Северном участке месторождения представлен двумя рудными линзами 3а и 3б, разделенными прослоем мощностью от 5 до 35 м. Мощность основной рудной линзы 3б увеличивается по падению от 10–15 м на горизонте –120 до 30–50 м на горизонте –190 м. Падение залежи крутое, угол 70–85°. Рудное тело сложено вкрапленными и полосчатыми рудами гранат-пироксен-магнетитового состава. Рудная линза 3а является маломощной (4–8 м), невыдержанной по падению. На горизонтах –260 и –340 м общие размеры рудной пачки по простиранию – 1500 м, по падению – до 140 м.

Категория устойчивости руд IV–V, коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова – $f=5-8$. С глубины 300 м (от земной поверхности) месторождение отнесено к категории склонных к горным ударам. В настоящее время горные работы на исследуемом участке достигли горизонта –260 м, что при абсолютных отметках поверхности около 190 м соответствует глубине 450 м.

Для установления оптимальных параметров камер, при которых их кровля будет сохранять общую устойчивость, а также межкамерных и межблочных целиков по простиранию и вкрест простирания, было выполнено компьютерное моделирование методом конечных элементов в двумерной постановке. Использование метода численного моделирования позволяет учитывать гораздо большее количество факторов, влияющих на состояние массива [2–7]. Данный метод находит все более широкое применение для расчета устойчивости подземных выработок, способствуя решению целого ряда задач – снижения потерь и разубоживания

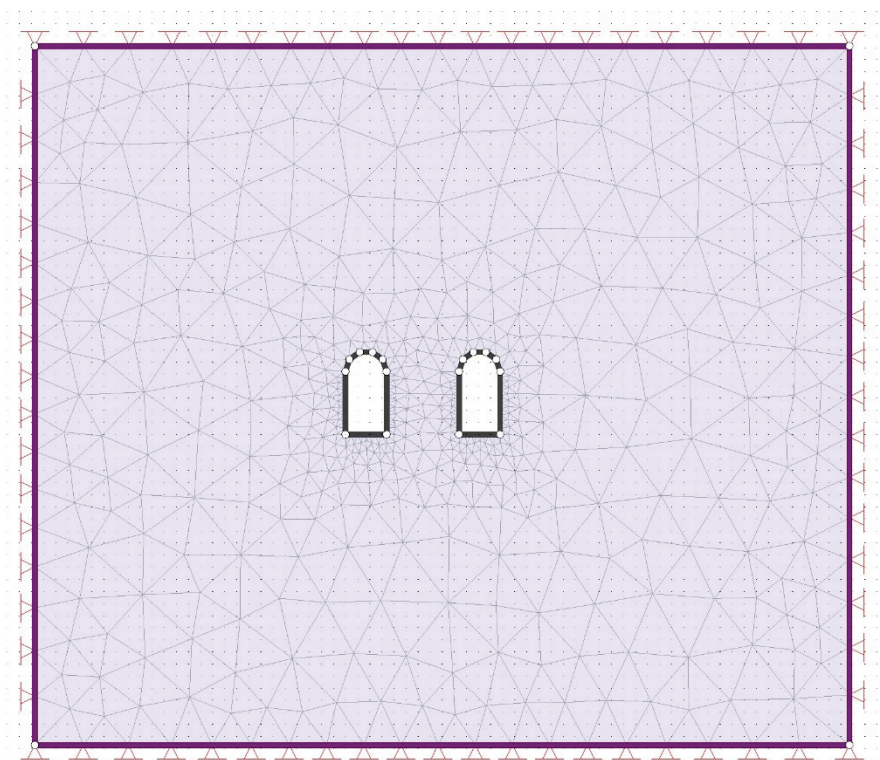


Рис. 1. Конечно-элементная модель массива горных пород, вмещающего подземные выработки (камеры)

Fig. 1. Finite element model of rock mass including underground excavations (chambers)

руды [8–10], обеспечения безопасности горных работ в удароопасных условиях [3, 11], совершенствования систем разработки [12–18] и др.

Моделирование выполнялось в программном комплексе Rocscience RS2 (ранее – Phase2) [19]. Программа RS2 представляет собой мощный инструмент для моделирования методом конечных элементов, позволяя быстро создавать сложные многостадийные модели, а также предоставляет широкие возможности для всестороннего анализа полученных результатов [12, 20].

Созданная модель представляет собой упруго-пластичный массив, в котором поочередно были образованы две выработки (камеры), разделенные между собой целиком (рис. 1). Выбор количества камер обоснован размерами очистного блока на участке работ.

Граничные условия для модели установлены по данным ранее выполненных лабораторных испытаний образцов: $\gamma=0,026 \text{ МН/м}^3$ – удельный вес горного массива (налегающей породной толщи); $\lambda=\mu/(1-\mu)=0,3/(1-0,3)=0,4$ – коэффициент бокового давления горного массива; $\mu=0,3$ – коэффициент Пуассона.

В модели заданы действующие в массиве горизонтальные ($\sigma_{\text{шир}}$, $\sigma_{\text{мер}}$) и вертикальные напряжения ($\sigma_{\text{верт}}$), определенные ранее натурными измерениями на данном участке месторождения [21, 22]: $\sigma_{\text{верт}}=13 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{шир}}=16 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{мер}}=16\text{--}20 \text{ МПа}$.

Моделирование производилось для глубины $H=500 \text{ м}$.

Так как основной задачей данного исследования является оценка устойчивости рудных целиков, в качестве прочностных характеристик пород массива были приняты физико-механические свойства магнетитовой руды, определенные ранее лабораторными испытаниями в рамках разработки проекта на отработку данного участка месторождения:

- Предел прочности образца пород на сжатие $\sigma_{\text{сж}}=45 \text{ МПа}$;
- Модуль Юнга $E=5300 \text{ МПа}$.

В качестве модели поведения массива использовалась модель Хоека–Брауна (Hoek–Brown) [23, 24], одним из главных достоинств которой, в отличие от наиболее распространенной на практике модели Мора–Кулона, является ее нелинейность. Эмпирические параметры, предложенные Э. Хоеком и Э.Т. Брауном, учитывающие разнообразные структурные особенности и свойства скальных грунтов, были получены ими при анализе множества лабораторных и полевых испытаний [25].

Одной из самых важных характеристик грунта при использовании модели Хоека–Брауна является геологический индекс прочности GSI – безразмерная величина, характеризующая трещиноватость и раздробленность горных пород [25]. Данный параметр определяется на основании визуальной оценки структуры массива и поверхности трещин.

Помимо возможности учета структурных характеристик массива горных пород, модель также

принимает во внимание степень техногенного влияния на массив, зависящую от способов ведения горных работ. Коэффициент нарушения D характеризует вызываемое техногенным воздействием дополнительное нарушение сплошности массива. Данный параметр не зависит от типа, строения и физико-механических свойств исследуемого массива и не требует каких-либо дополнительных исследований – достаточно лишь сведений о способе отработки месторождения [25].

Параметр ненарушенной породы m_i устанавливается на основе геологического описания горной породы в соответствии с ее литологическим типом. Этот параметр также был получен Э. Хоеком и Э.Т. Брауном эмпирическим путем; он никак не описывает степень трещиноватости или физико-механические свойства грунта, а лишь соответствует его литологии и генезису [25].

Вышеперечисленные эмпирические параметры, используемые в модели Хоека–Брауна, определяются по соответствующим таблицам и диаграммам, представленным в работах авторов данной модели [23, 24], а также заложенным в программное обеспечение [19].

Так как массив характеризуется неоднородностью прочностных свойств и напряженно-деформированного состояния, то в программном комплексе Rocscience предусмотрен вероятностный анализ, учитывающий изменение в установленных интервалах заданных граничных условий для создаваемой модели массива (табл. 1).

Таблица 1. Интервалы изменения граничных условий

Table 1. Boundary conditions variation intervals

Свойства массива Rock mass properties	Среднее значение Mean value	Стандартное отклонение Standard deviation
σ_{ci} , прочность на одноосное сжатие образца горной породы в ненарушенном состоянии intact uniaxial compressive strength	45 МПа/MPa	15 МПа/MPa
GSI, геологический индекс прочности Geological Strength Index	55	10
m_i , параметр ненарушенной породы material constant for the intact rock	20	5
D , коэффициент нарушения disturbance factor	0,8	0,1
$\sigma_{верт}$, вертикальные напряжения vertical stresses	13	2
$\sigma_{шир}$, горизонтальные широтные напряжения horizontal latitudinal stresses	16	2
$\sigma_{мер}$, горизонтальные меридиональные напряжения horizontal longitudinal stresses	18	2

Исследования включали две стадии: на первом этапе анализировалось изменение напряженно-деформированного состояния окружающего массива после образования одиночной камеры, на втором этапе – после формирования двух камер. Кроме того, моделирование выполнялось при различных

геометрических параметрах выработок – камер и целиков [26].

Результаты и обсуждение

В результате численного моделирования определяется изменение напряженно-деформированного состояния окружающего массива, вызванное образованием выработанного пространства, на основании чего оцениваются условия его устойчивости, а именно – коэффициент устойчивости (Strength Factor) и распределение трещин (Yielded Elements) [27].

Значение коэффициента Strength Factor, равное или превышающее 1,0, соответствует устойчивому состоянию выработки, меньшие значения – высокой вероятности обрушения массива. На основании оценки данного параметра были установлены оптимальные размеры выработок, обеспечивающие их устойчивость в процессе разработки (табл. 2). Кроме того, придание кровле камер арочной формы позволяет снизить величину действующих на ее контуре напряжений [26, 28].

Таблица 2. Оптимальные параметры камер и целиков

Table 2. Optimal parameters of chambers and pillars

	Вкрест простирания Across strike	По простиранию Along strike
Высота камеры Chamber height	Не более 35 м Not more than 35 m	
Ширина камеры Chamber width	Не более 17 м Not more than 17 m	Не более 22 м Not more than 22 m
Межкамерный целик Room pillar	Не менее 30 м Not less than 30 m	–
Межблочный целик Block pillar	–	Не менее 30 м Not less than 30 m
Форма кровли Roof form	Арочная Arched	

Результаты моделирования с заданными оптимальными параметрами камер и целиков представлены на рис. 2–4. Необходимо отметить, что ввиду схожести граничных условий, а именно – близости значений действующих широтных и меридиональных напряжений и пространственного расположения выработок относительно них, вычисленные размеры устойчивых камер вкрест и по простиранию близки между собой. Следовательно, и результаты компьютерного моделирования, полученные для продольных и поперечных разрезов выработок, практически аналогичны.

На рис. 2 показано определенное по результатам моделирования распределение коэффициента устойчивости массива вокруг выработанного пространства вкрест простирания, а также картина распределения возможных трещин сдвига и растяжения (Shear and Tension joints).

При анализе рис. 2 видно, что по данным моделирования значение коэффициента устойчивости вблизи выработанного пространства составляет не менее 1,0, что соответствует устойчивому состоянию массива. Картина распределения потенциальных трещин свидетельствует о возможности ло-

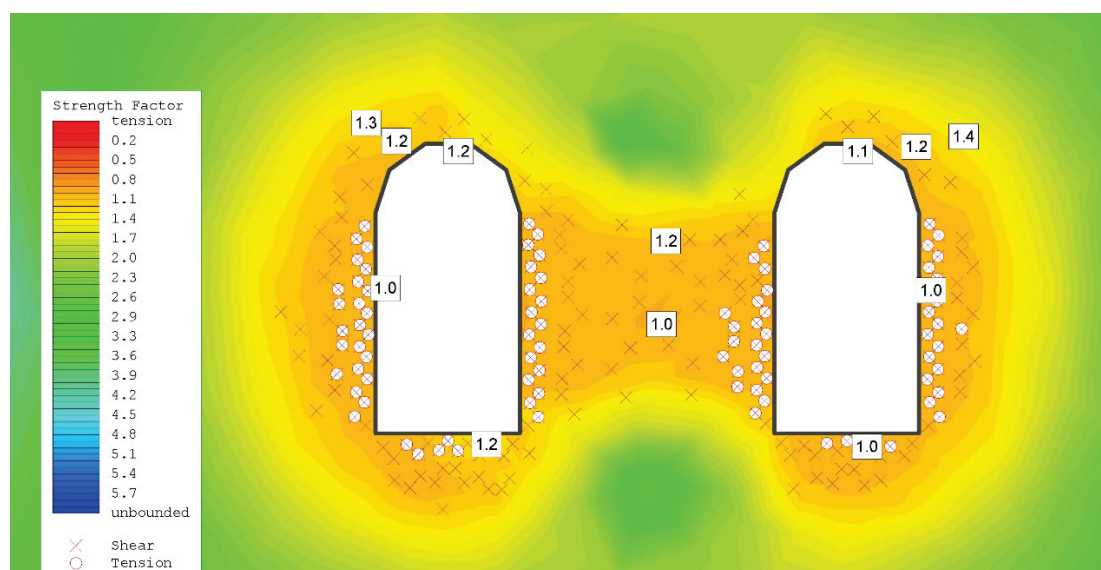


Рис. 2. Распределение коэффициента устойчивости массива (разрез вкрест простирания)

Fig. 2. Distribution of the rock mass safety factor (section across strike)

кального нарушения стенок камер, но при этом устойчивость кровли сохраняется.

На рис. 3 представлены величины и направления смещений окружающего массива и контуров выработок, вызванные изменением напряженно-деформированного состояния после образования двух камер, определенные в результате моделирования. Прогнозируемые смещения породных стенок направлены к центрам камер – явление, известное как *конвергенция* [29–31]. Их величины на разрезе вкрест простирания по расчетным данным могут достигать значения 11 см во внешних стенках выработки и около 6 см в ее кровле.

На рис. 4 представлены результаты вероятностного анализа обрушения окружающего массива

с учетом изменения граничных условий (табл. 1). Темные области свидетельствуют о том, что обрушение окружающего массива произойдет при любом значении граничных условий из заданного интервала. Более светлые области свидетельствуют о наименее вероятной возможности обрушения массива.

При анализе рис. 4 установлено, что зоны наибольшей вероятности обрушения массива сконцентрированы в стенках и почве камер, возможность обрушения кровли камер маловероятна. Глубина нарушенной зоны по данным моделирования составляет около 6 м. Вероятность устойчивости целика оценивается как удовлетворительная для заданного диапазона значений граничных условий.

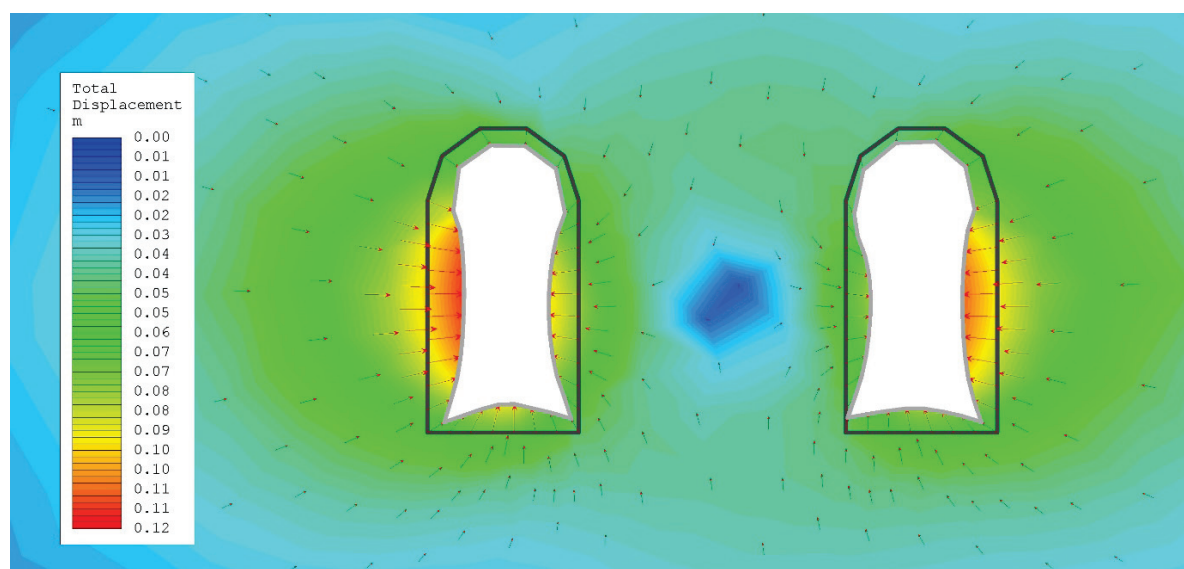


Рис. 3. Смещения породных стенок выработок и окружающего массива (разрез вкрест простирания)

Fig. 3. Displacements of the excavations' checks and the surrounding rock mass (section across strike)



Рис. 4. Зоны распределения вероятности разрушения массива в заданных интервалах граничных условий (разрез по простиранию)

Fig. 4. Zones of distribution of the rock mass destruction probability within the variation intervals of boundary conditions (section along strike)

Выводы

Рекомендованная для применения на ш. «Соколовская» двухстадийная технология отработки очистных рудных блоков снижает риск проникновения ПГМ в выработки, обеспечивая более безопасное и эффективное ведение горных работ, чем принятая в настоящее время на руднике система этажного принудительного обрушения со сплошной выемкой руды, а также повышает полноту и качество выемки руды. Однако полностью ее преимущества реализуются при условии сохранения устойчивости кровли компенсационных камер.

Выполненное методом конечных элементов многовариантное численное моделирование влияния очистных выработок на массив позволило определить оптимальные геометрические параметры камер и целиков, обеспечивающие устойчивость окружающего массива в процессе разработки. Рекомендуемая арочная форма кровли камер

обеспечивает устойчивость потолочины, минимизируя вероятность ее самообрушения и выхода ПГМ в выработанное пространство.

Применение программного комплекса Rocscience RS2 позволило учесть большое количество факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние массива, а также проанализировать изменение граничных условий модели и оценить вероятность обрушения. Реализованный в программном комплексе критерий прочности Хоека–Брауна учитывает нелинейное деформирование скальных грунтов, а также структурные особенности массива и степень техногенного воздействия на него.

С целью проверки результатов теоретических исследований на руднике планируется создание опытно-промышленного участка. Результаты натурных исследований позволят сделать окончательный вывод об эффективности предложенной технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Урдубаев Р.А., Верин С.В., Шихаметов Р.В. Подземные горные работы в АО «ССГПО» // Горный журнал. – 2014. – № 6. – С. 32–37.
2. Тюпин В.Н. Установление динамически устойчивых размеров обнажений трещиноватого напряженного горного массива при камерных вариантах систем разработки // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2016. – Т. 22. – № 6. – С. 31–39.
3. Куранов А.Д., Сидоров Д.В., Сучилин А.В. Метод определения безопасных параметров междуканальных целиков на рудниках ЗАО «Эльконский ГМК» // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2013. – № 1. – С. 115–119.
4. Niculae R.R. The surface's stability analysis with finite element method under the coal mining at e.m. Livezeni // Journal of Young Scientist. – 2013. – V. I. – P. 69–74.
5. Radouane N., Boukelloul M., Fredj M. Stability Analysis of Underground Mining and their Application on the Mine Chaabte El Hamra, Algeria // Procedia Earth and Planetary Science. – 2015. – V. 15. – P. 237–243. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.058
6. Shabanimashcool M., Li C.C. A numerical study of stress changes in barrier pillars and a border area in a longwall coal mine // Int. J. Coal Geol. – 2013. – V. 106. – P. 39–47. DOI: 10.1016/j.coal.2012.12.008
7. Numerical investigation of coal pillar failure under simultaneous static and dynamic loading / S. Wang, S. Hao, Y. Chen, J. Bai, X. Wang, Y. Xu // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2016. – V. 84. – P. 59–68. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.01.017

8. Авдеев А.Н., Давиденко А.А., Сосновский Л.И. Обоснование параметров устойчивых междуканальных целиков и обнажений кровли камер на Тыретьском руднике // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 12. – С. 66–71.
9. Подопригра В.Е. Обоснование рациональных параметров поэтажно-камерной системы разработки с применением метода конечных элементов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 5. – С. 216–219.
10. Литвиненко В.С., Богуславский Э.И., Коржавых П.В. Физическое и математическое моделирование технологических параметров этажно-камерной системы разработки нижнего горизонта рудника им. Губкина // Записки горного института. – 2012. – Т. 195. – С. 115–119.
11. Черепов А.А., Ширяев С.Н., Кулак В.Ю. Исследование распределения напряжений и деформаций геомассива при камерно-столбовой системе разработки мощного пологого угольного пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 9. – С. 170–178. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-9-0-170-178
12. Петров А.Н., Слепцов В.И., Акимов Д.Д. Оценка устойчивости камер в условиях месторождения «Мир» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 9. – С. 389–393.
13. Nomikos P.P., Sofianos A.I. An analytical probability distribution for the factor of safety in underground rock mechanics // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2011. – V. 48. – Iss. 4. – P. 597–605. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2011.02.015
14. Yang H., Kim W., Ali M. Performance of pillar design in underground stone mines that include discontinuities // Geosystem Engineering. – 2012. – V. 15. – Iss. 3. – P. 187–194. DOI: 10.1080/12269328.2012.704160
15. Gaede O., Schrank C., Canbulat I., Karrech A. A strain-based failure criterion for pillar stability analysis // AusRock 2014: Proceedings of Third Australasian Ground Control in Mining Conference. – Sydney: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2014. – P. 393–398.
16. Huang Z., Dai X., Dong L. Buckling failures of reserved thin pillars under the combined action of in-plane and lateral hydrostatic compressive forces // Comput. Geotech. – 2017. – V. 87. – P. 128–138. DOI: 10.1016/j.compgeo.2017.02.013
17. Research on reasonable size of large coal pillar between panels at mining face with soft surrounding rock / W. Zhang, X. Kong, T. Kang, G. Zhao // Min. Res. Dev. – 2013. – V. 33. – P. 14–17.
18. Determining the reasonable width of narrow pillar of entry in gob entry driving in the large pillar / K. Zhang, Y. Jiang, Z. Zhang, Y. Zhang, X. Pang, X. Zeng // J. Min. Saf. Eng. – 2014. – V. 31. – P. 255–262.
19. Rocscience RS2. URL: <https://www.rocscience.com/software/rs2> (дата обращения 07.08.2018).
20. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива в окрестности очистного пространства в программе «Phase 2» / П.С. Шпаков, В.Н. Долгонос, А.А. Нагибин, Е.В. Кайгородова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 9. – С. 59–66.
21. Панжин А.А., Панжина Н.А. Природное и техногенно измененное напряженно-деформированное состояние породного массива на ССПЮ // Маркшейдерия и недропользование. – 2014. – № 5 (73). – С. 44–51.
22. Особенности напряженного состояния горного массива Соколовского железорудного месторождения / А.Е. Балец, А.А. Панжин, Ю.П. Коновалова, Д.Е. Мельник // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений: сб. докладов VII Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург, 11 апреля 2018. – Екатеринбург: УГТУ, 2018. – С. 256–264.
23. Hoek E., Wood D., Shah S. A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses // Eurock 1992: Proceedings of the International ISRM Symposium on Rock Characterization. – London, 1992. – P. 209–213.
24. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition // NARMS-TAC 2002: Proceedings of the Conference. – Toronto, 2002. – P. 267–273.
25. Сас И.Е., Бершов А.В. Об особенностях модели поведения скального грунта Хоека – Брауна и задании ее исходных параметров // Инженерные изыскания. – 2015. – № 13. – С. 42–47.
26. Steady analysis of gob-side entry retaining formed by roof fracturing and control techniques by optimizing mine pressure / Y. Gao, Z. Guo, J. Yang, J. Wang, Y. Wang // J. China Coal Soc. – 2017. – V. 42. – P. 1672–1681.
27. Sepehri M., Apel D., Liu W. Stope stability assessment and effect of horizontal to vertical stress ratio on the yielding and relaxation zones around underground open stopes using empirical and finite element methods // Arch. Min. Sci. – 2017. – V. 62. – № 3. – P. 653–669. DOI: 10.1515/amsc-2017-0047
28. Павлов С.П., Крысько В.А., Бодягина К.С. К вопросу об оптимизации формы геологических выработок и топологии их укрепления // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 6–12.
29. Харисов Т.Ф. Исследования конвергенции породных стенок ствола в условиях запредельного состояния призабойного массива // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2017. – № 5. – С. 46–51.
30. Харисов Т.Ф., Князев Д.Ю. Закономерности деформирования породных стенок ствола в процессе продвижения забоя в условиях запредельного напряженно-деформированного состояния массива // Проблемы недропользования. – 2017. – № 1 (12). – С. 96–101. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.096
31. Харисов Т.Ф., Антонов В.А. Исследование деформации горных пород в процессе проходки вертикального ствола // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 3. – С. 146–150.

Поступила 13.10.2018 г.

Информация об авторах

Харисов Т.Ф., кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений Института горного дела УрО РАН.

Харисова О.Д., научный сотрудник лаборатории сдвижения горных пород Института горного дела УрО РАН.

UDC 622.831:622.274

GEOMECHANICAL SUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS OF STABLE CHAMBERS AND PILLARS IN COMPLEX MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS

Timur F. Kharisov¹,

timur-ne@mail.ru

Olga D. Kharisova¹,

OlgaZheltysheva@gmail.com

¹ Institute of Mining of Ural Branch of RAS,
58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620075, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity of ensuring safety at the Sokolovski underground mine, as well as improving the completeness and quality of excavation of resources in complex mining and geological conditions – in the presence of a covering layer of watered loose sediments.

The aim of the research is to determine the optimal parameters of stable chambers and pillars to prevent rock collapse and penetration of sandy-argillaceous deposits into underground excavations.

The object: the rock mass in the Northern area of Sokolovskoe deposit.

Methods. Multivariate numerical modeling with the finite element method in a two-dimensional approach was performed in the Rocscience RS2 software, which allowed taking into account a large number of factors affecting the state of the massif. The calculations included not only the physical and mechanical properties of rocks and the acting stresses, but also the structural characteristics of the rock mass, as well as the level of technogenic impact. As a model of the massif behavior, the Hoek–Brown model was used, which distinctive advantage is nonlinearity. Since the real rock mass is characterized by heterogeneity of the strength properties and the stress-strain state, the probabilistic analysis provided in the Rocscience software was implemented, taking into account the variations of the boundary conditions within the established intervals for the created model.

As a result of numerical simulation, a change of the stress-strain state of the massif was determined, on the basis of which the safety factor of the surrounding rock mass was calculated, as well as the magnitudes and directions of its displacements, and also zones of distribution of the massif destruction probability within the given intervals of boundary conditions were established. The parameters of the chambers and pillars which ensure the overall stability and minimize the possibility of breaking mud water into the workings were determined.

Conclusions. Maintaining the stability of the roof of the underground chambers while stopping ore blocks at the Sokolovskaya mine will enable to reduce the risk of sandy-argillaceous deposits penetration into the underground openings, ensuring safe and efficient mining, and also to improve the completeness and quality of resources excavation. The multivariate numerical modelling of the influence of mine openings on the rock mass made by the finite element method allowed determining the optimal geometric parameters of chambers and pillars that ensure the stability of the surrounding massif. Application of the Rocscience RS2 software due to accounting a large number of factors affecting the state of the massif significantly improves the reliability of rock mass stability assessment.

Key words:

Underground mining, parameters of chambers and pillars, stability of excavations, rock collapse, stress-strain state, Hoek–Brown model, finite element method, numerical simulation, Rocscience RS2, convergence of excavations.

REFERENCES

1. Urdubayev R.A., Verin S.V., Shikhametov R.V. Underground mine operations in «Sokolovsko-Sarbaiskoe mining and concentration production association» JSC. *Mining journal*, 2014, no. 6, pp. 32–37. In Rus.
2. Tyupin V.N. Establishment of dynamically steady sizes of exposures of the jointed intense massif at chamber options of systems of development. *Bulletin of the Transbaikalian State University*, 2016, vol. 22, no. 6, pp. 31–39. In Rus.
3. Kuranov A.D., Sidorov D.V., Suchilin A.V. Method for determining safety parameters of room pillars at uranium ore mines of Elkon ore district. *Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*, 2013, no. 1, pp. 115–119. In Rus.
4. Niculae R.R. The surface's stability analysis with finite element method under the coal mining at e.m. Livezeni. *Journal of Young Scientist*, 2013, vol. I, pp. 69–74.
5. Radouane N., Boukelloul M., Fredj M. Stability Analysis of Underground Mining and their Application on the Mine Chaabte El Hamra, Algeria. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, vol. 15, pp. 237–243. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.058
6. Shabanimashcool M., Li C.C. A numerical study of stress changes in barrier pillars and a border area in a longwall coal mine. *Int. J. Coal Geol.*, 2013, vol. 106, pp. 39–47. DOI: 10.1016/j.coal.2012.12.008
7. Wang S., Hao S., Chen Y., Bai. J., Wang X., Xu Y. Numerical investigation of coal pillar failure under simultaneous static and dynamic loading. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2016, vol. 84, pp. 59–68. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.01.017
8. Avdeev A.N., Davidenko A.A., Sosnovskiy L.I. Parameter justification of sustainable intervening pillars and roof exposures at Tyret mine. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2014, no. 12, pp. 66–71. In Rus.
9. Podoprigora V.E. Obosnovanie ratsionalnykh parametrov podetazhno-kamernoy sistemy razrabotki s primeneniem metoda konechnykh elementov [Substantiation of rational parameters of the sublevel-chamber development system using the finite element method]. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2005, no. 5, pp. 216–219.
10. Litvinenko V.S., Boguslavskiy E.I., Korhavykh P.V. Physical and mathematical modelling of level-chamber method operational parameters at the bottom level of Gubkin mine. *Journal of Mining Institute*, 2012, vol. 195, pp. 115–119. In Rus.
11. Cherepov A.A., Shiryayev S.N., Kulak V.Yu. Stress and strain distribution in geomass under room-and-pillar mining of a thick gently dipping coal bed. *Mining informational and analytical bulletin*, 2017, no. 9, pp. 170–178. In Rus. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-9-0-170-178

12. Petrov A.N., Sleptsov V.I., Akimov D.D. Estimation of stope stability at the Mir deposit. *Mining informational and analytical bulletin*, 2014, no. 9, pp. 389–393. In Rus.
13. Nomikos P.P., Sofianos A.I. An analytical probability distribution for the factor of safety in underground rock mechanics. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2011, vol. 48, Iss. 4, pp. 597–605. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2011.02.015
14. Yang H., Kim W., Ali M. Performance of pillar design in underground stone mines that include discontinuities. *Geosystem Engineering*, 2012, vol. 15, Iss. 3, pp. 187–194. DOI: 10.1080/12269328.2012.704160
15. Gaede O., Schrank C., Canbulat I., Karrech A. A strain-based failure criterion for pillar stability analysis. AusRock 2014. *Proc. of Third Australasian Ground Control in Mining Conference*. Sydney, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2014. pp. 393–398.
16. Huang Z., Dai X., Dong L. Buckling failures of reserved thin pillars under the combined action of in-plane and lateral hydrostatic compressive forces. *Comput. Geotech.*, 2017, vol. 87, pp. 128–138. DOI: 10.1016/j.compgeo.2017.02.013
17. Zhang W., Kong X., Kang T., Zhao G. Research on reasonable size of large coal pillar between panels at mining face with soft surrounding rock. *Min. Res. Dev.*, 2013, vol. 33, pp. 14–17.
18. Zhang K., Jiang Y., Zhang Z., Zhang Y., Pang X., Zeng X. Determining the reasonable width of narrow pillar of entry in gob entry driving in the large pillar. *J. Min. Saf. Eng.*, 2014, vol. 31, pp. 255–262.
19. Rocscience RS2. Available at: <https://www.rocsience.com/software/rs2> (accessed 1 August 2018).
20. Shpakov P.S., Dolgonosov V.N., Nagibin A.A., Kaygorodova E.V. Modeling stress-strain state of rocks around stoping zone in Phase 2 program. *Mining informational and analytical bulletin*, 2015, no. 9, pp. 59–66. In Rus.
21. Pangin A.A., Pangina N.A. Native and technogenic influenced stressedly deformed rock massif state at «SSGPO» public company. *Mine Surveying and Subsurface Exploitation*, 2014, no. 5 (73), pp. 44–51. In Rus.
22. Balek A.E., Panzhin A.A., Kononova Yu.P., Melnik D.E. Osobennosti napryazhennogo sostoyaniya gornogo massiva Sokolovskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya [Features of the stressed state of the mountain massif of Sokolovsky iron-solid deposit]. *Innovatsionnye geotekhnologii pri razrabotke rudnykh i nerudnykh mestorozhdeny. Sbornik dokladov VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Innovative geotechnologies in the development of ore and non-ore deposits. Proc. of Seventh International scientific and technical conference]. Ekaterinburg, Ural State Mining University, 2018. pp. 256–264.
23. Hoek E., Wood D., Shah S. A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses. Eurock 1992. *Proc. of the International ISRM Symposium on Rock Characterization*. London, 1992. pp. 209–213.
24. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition. *NARMS-TAC 2002. Proc. of the Conference*. Toronto, 2002. pp. 267–273.
25. Sas I.E., Bershov A.V. On features of the Hoek-Brown rock behavior model and determining its initial parameters. *Engineering Survey*, 2015, no. 13, pp. 42–47. In Rus.
26. Gao Y., Guo Z., Yang J., Wang J., Wang Y. Steady analysis of gob-side entry retaining formed by roof fracturing and control techniques by optimizing mine pressure. *J. China Coal Soc.*, 2017, vol. 42, pp. 1672–1681.
27. Sepehri M., Apel D., Liu W. Stope stability assessment and effect of horizontal to vertical stress ratio on the yielding and relaxation zones around underground open stopes using empirical and finite element methods. *Arch. Min. Sci.*, 2017, vol. 62, no. 3, pp. 653–669. DOI: 10.1515/amsc-2017-0047
28. Pavlov S.P., Krysko V.A., Bodyagina X.S. On the issue of optimizing the shape of geological excavations and topology of their strengthening. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 6–12. In Rus.
29. Kharisov T.F. Mine shaft rock walls convergence investigations in the conditions of the out-of-limit state of the borehole massif. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2017, no. 5, pp. 46–51. In Rus.
30. Kharisov T.F., Knyazev D.Yu. The regularities of deforming the shaft's rock walls during the process of face advancing in the conditions of rock mass limit-exceeding stressed- deformed state. *Subsurface Exploitation Issues*, 2017, no. 1 (12), pp. 96–101. In Rus. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.096
31. Kharisov T.F., Antonov V.A. Study of the deformation of rocks in the process of vertical shaft sinking. *Mining informational and analytical bulletin*, 2015, no. 3, pp. 146–150. In Rus.

Received: 13 October 2018.

Information about the authors

Timur F. Kharisov, cand. Sc., senior researcher, Institute of Mining of Ural Branch of RAS.

Olga D. Kharisova, researcher, Institute of Mining of Ural Branch of RAS.

УДК 550.4+552.52 (234.853)

О ПРИМЕНЕНИИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЛИТОХИМИЧЕСКИХ ДИАГРАММ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ТЕФРОГЕННЫХ ПЕСЧАНИКОВ

Фазлиахметов Александр Маратович,
famrb@mail.ru

Институт геологии – обособленное структурное подразделение
Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук,
Россия, 450077, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2.

Актуальность. Диаграммы, позволяющие на основе литохимических особенностей кластолитов предполагать геохимическую позицию седиментационных бассейнов, используются уже на протяжении многих десятилетий. Вместе с тем возможность их применения для изучения тефрогенных песчаников остается неясной, а результаты противоречивыми.

Цель исследования состоит в сравнительном анализе положения на наиболее часто применяемых диаграммах точек, отвечающих составу двух групп пород – тефрогенным песчаникам и вулканитам их источника сноса.

Объектами исследования являются тефрогенные граувакки улутауской свиты и вулканиты (от риолитов до базальтов) урлядинской толщи Магнитогорской мегазоны Южного Урала. Улутауская свита относится к живетскому и нижней части франского яруса. Слагающие ее граувакки являются тефрогенными турбидитами и дебритами, сформированными в глубоководной впадине, расположенной у подножия энзиматической Магнитогорской островной дуги. В современном эрозионном срезе осевой зоне островной дуги соответствуют вулканиты урлядинской толщи.

Методы. В основу сопоставления положены результаты силикатного анализа граувакк улутауской свиты (202 образца) и вулканитов урлядинской толщи (202 образца). Сравнение проведено на основе диаграмм Мейнарда, Бхатии, Розера–Корша и Верма–Армстронга–Алтрина.

Результаты. Анализ диаграмм показал, что более реалистичные результаты дает применение основных вулканокластических граувакк ($\text{SiO}_2 < 63\%$). Исключением в данном случае является диаграмма $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) - \text{TiO}_2$: большинство точек оказалось за пределами каких-либо полей. Точки, отвечающие составу кислых разностей граувакк ($\text{SiO}_2 > 63\%$), попадают на многих диаграммах в поля энзиматических островных дуг, окраин андского типа и пассивных континентальных окраин. Наилучшие результаты для кислых разностей были получены при использовании диаграммы DF1–DF2 и модифицированной диаграммы М. Бхатии $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{K}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O}$. Поля граувакк на большинстве построенных диаграмм совпадают с полями вулканитов и являются по сравнению с ними более компактными, что вызвано смешанным составом песчаников и низкой эксплозивностью базальтовых расплавов. Полученные результаты во многом не согласуются с результатами аналогичных исследований. Следовательно, выводы, получаемые при построении литохимических геохимических диаграмм, не могут считаться окончательными и должны дополняться другими методами.

Ключевые слова:

Геохимические диаграммы, песчаники, граувакки, энзиматическая островная дуга, девон, Магнитогорская мегазона, Южный Урал.

Введение

В практике литологических исследований наряду с современными методами реконструкций, основанными на содержании и соотношении в породах малых элементов, изотопов, акцессорных минералов и т. д., по-прежнему остаются востребованными результаты обработки литохимических данных [1–6].

За несколько предшествующих десятилетий предложено множество методов интерпретации литохимического состава обломочных пород. Суть их часто сводится к сопоставлению исследуемых образцов с эталонами. Одним из наиболее распространенных вариантов такого подхода являются диаграммы с полями, отвечающими тем или иным составам пород, обстановкам седиментации и т. д. Подобные диаграммы часто применяются при изучении «типичных» обломочных пород – кварцевых, аркозовых, литокластических песчаников, тогда как вулканокластические или тефрогенные песчаники рассматриваются гораздо реже. Поэтому интерпретацию их литохимического состава посредством диаграмм с эталонными полями нельзя считать многократно опробованным и надежным методом.

Тефрогенные песчаники во многом отличаются от песчаников других генетических типов. Прежде всего, это касается мобилизации слагающего их материала – преимущественно в результате эксплозий. Соответственно состав их зависит не только от факторов, в существенной мере определяющих состав экзолитических обломочных образований (площадь водосбора, петрофунд, климат, гидродинамические условия и др.), а теснейшим образом связан еще и с составом извергаемой лавы, степенью ее кристаллизации (наличие вкрапленников), положением вулкана относительно уровня моря, расчлененным рельефом и др. Исходя из этого ясно, что положение фигуративных точек состава тефрогенных песчаников на геохимических диаграммах зависит от гораздо большего количества факторов, нежели положение точек более распространенных экзолитических песчаников.

В связи с изложенным представляется важным сравнить положение на распространенных геохимических литохимических диаграммах: а) эталонных полей, нанесенных на диаграммы их авторами; б) точек, отвечающих составу тефрогенных песчаников и в) точек, отвечающих составу вулка-

нитов питающих провинций тефрогенных песчаников. Результаты этих сопоставлений на примере хорошо изученных девонских островодужных песчаников улутауской свиты и вулканитов урлядинской толщи Магнитогорской мегазоны Южного Урала изложены в данном сообщении.

Объекты изучения

Улутауская свита сложена кластолитами всевозможных гранулометрических классов, среди которых существенно преобладают собственно граувакки, полевошпатовые и кварцево-полевошпатовые граувакки. Подчиненное значение имеют кремни.

Стратиграфическое положение улутауской свиты, согласно [7], – живетский и нижняя часть франского яруса, конодонтовые зоны *hemiansatus-transitans*. Мощность 700–2000 м.

Граувакки улутауской свиты сложены зернами вулканогенных пород основного, среднего и кислого состава, плагиоклазом и кварцем. Сочетания их

различны [8–10]. Мобилизация обломочного материала осуществлялась в осевой зоне (в области вулканизма) Магнитогорской островной дуги в результате эксплозий, размыва нелигифицированной пирокластики и литифицированных вулканогенных образований [9, 11]. В дальнейшем обломочный материал переносился в глубоководную впадину. С востока (в современных координатах) она была ограничена активной Магнитогорской, а с запада – потухшей Ирландской островными дугами (рис. 1). Основными агентами транспортировки служили турбидные и обломочные потоки.

Скорость седиментации была высокой (лавинной), чему способствовал большой объем изверженной пирокластики, крутизна островодужных склонов, сейсмичность территории и прочие факторы [12]. Соответственно интенсивного химического выветривания кластического материала не происходило, а существенных отличий состава песчаников улутауской свиты от состава вулканитов урлядинской толщи нет.

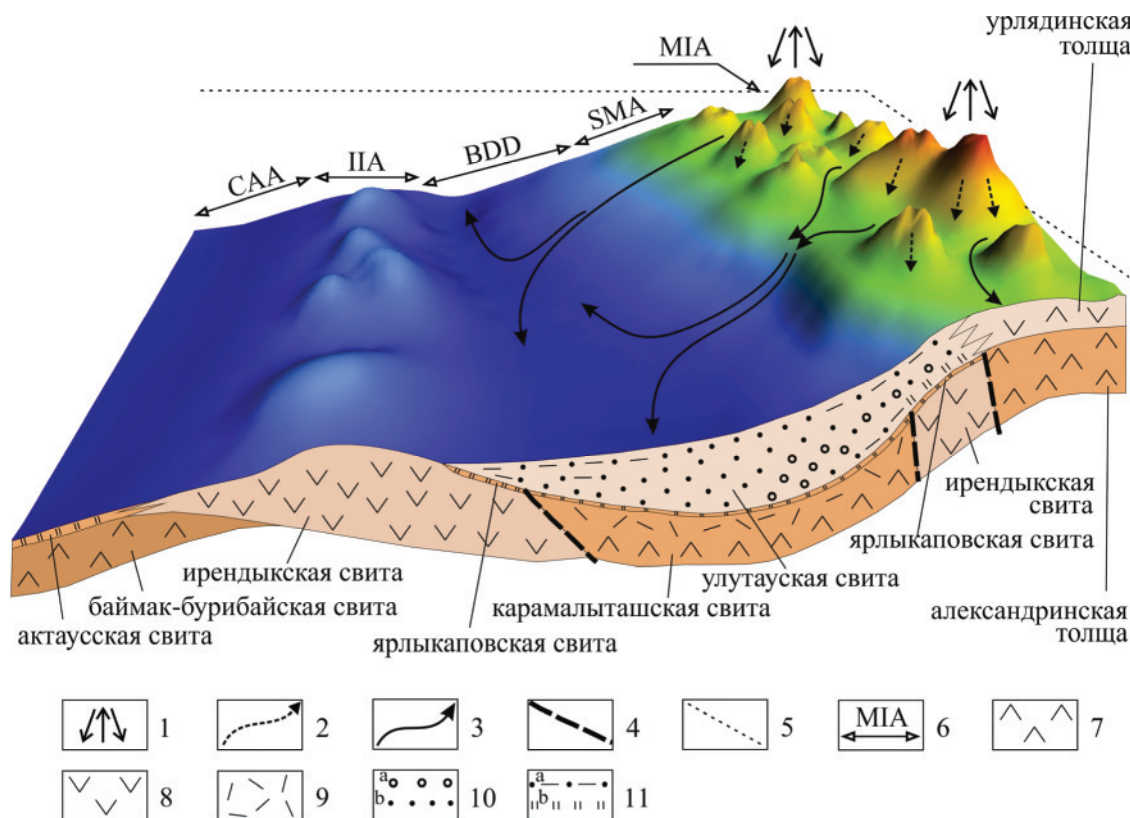


Рис. 1. Реконструкция живетско-раннефранского бассейна Магнитогорской островной дуги по [9]. Условные обозначения: 1) эксплозии и оседание пирокластики, 2) размыв вулканических аппаратов, 3) гравитационные потоки, осуществившие перенос кластики в глубоководные области; 4) предполагаемые разрывные дислокации; 5) уровня моря; 6) зоны внутри бассейна: MIA – активная Магнитогорская островная дуга, SMA – глубоководный склон, BDD – ложе глубоководной впадины, PIA – потухшая Ирландская островная дуга, CAA – зона кремнеаккумуляции; 7) базальты; 8) андезиты и андезибазальты; 9) риолиты и дациты; 10) грубообломочные кластолиты (а) и песчаники (b); 11) алевролиты (а), кремни и яшмы (b)

Fig. 1. Reconstruction of the Givetian – Early Frasnian basin of the Magnitogorsk island arc according to [9]. Legend: 1) explosions and accumulation of pyroclastics, 2) clastic flow during destruction of volcanos, 3) sedimentary gravity flows moving to deep-water zones; 4) alleged faults; 5) sea level; 6) zones within the basin: MIA – active Magnitogorsk island arc, SMA – slope of Magnitogorsk island arc, BDD – bottom of the deepwater depression, PIA – extinct Ireland island arc, CAA – chert-accumulation area; 7) basalts; 8) andesites and andesite basalts; 9) rhyolites and dacites; 10) coarse grained sediments (a) and sandstones (b); 11) siltstone (a), cherts and jasper (b)

Областям вулканизма Магнитогорской островной дуги в живетско-раннефранское время и, соответственно, питающей провинции кластоцитов улутауской свиты отвечает *урлядинская толща* [11, 13, 14]. Она сложена эффузивами и туфами от основного до кислого состава [7]. Мощность их от 80 до 1300 м.

Магнитогорская островная дуга, согласно [15–17], являлась энсиматической.

Фактический материал и методика работ

В основе работы лежат 202 определения содержания породообразующих элементов методами «мокрой» химии (ИГ УФИЦ РАН, аналитик С.А. Ягудина) в граувакках улутауской свиты из коллекции автора. Результаты силикатного анализа вулканитов урлядинской толщи общим количеством 202 пробы собраны из фондовых работ разных лет сотрудниками АО «Челябинскгеолсъемка» и любезно предоставлены В.М. Мосейчуком (ООО НПП «Геопойск», г. Челябинск).

Для дальнейшего анализа граувакки были разделены на две группы по содержанию кремнезема: кислые вулканокластические граувакки (52 образца) с концентрацией SiO_2 более 63 % и основные вулканокластические граувакки (150 образцов) – SiO_2 менее 63 %. Граница, равная 63 %, была установлена в соответствии с [18]. Вулканиты подразделены на 4 категории: риолиты и риодациты (SiO_2 более 69 %, 80 образцов), дациты (SiO_2 63–69 %, 44 образца), андезиты и андезибазальты (SiO_2 52–63 %, 44 образца) и базальты (SiO_2 45–52 %, 34 образца). Граничные содержания SiO_2 для перечисленных вулканитов заимствованы из [19].

При проведении анализа диаграмм на них выносились фигуративные точки состава пород. В дальнейшем подсчитывалось количество точек каждой из выделенных групп, попавшее в те или иные поля диаграмм, и рассчитывалась их доля в процентах от общего количества проб группы.

Результаты построения диаграмм

Диаграмма Дж. Мейнарда $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (рис. 2, б) [20, 21]. В поле островодужных кластоцитов андезитового и базальтового состава попало подавляющее большинство точек основных вулканокластических граувакк (95 %), базальтов (91 %), андезитов (77 %), дацитов (72 %), в меньшей мере – кислых вулканокластических граувакк (46 %) и риолитов (28 %). В полях окраин андского типа и островодужных осадков с преобладанием кластики кислых магматических образований расположились точки кислых граувакк (48 %), риолитов (51 %) и дацитов (10 %).

Диаграмма Б. Розера и Р. Корша $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (рис. 2, а) [21]. В поле энсиматических островных дуг оказалось большая часть точек, отвечающих основным вулканокластическим грауваккам (99 %), базальтам (97 %), андезитам (80 %), а также менее значимое количество точек кислых вул-

канокластических граувакк (31 %). По соотношению кремнезема и щелочей кислые разности соответствуют в большей мере отложениям окраин андского типа: граувакки на 68 %, дациты – на 55 % и риолиты – на 85 %.

Факторная диаграмма М. Бхатии $F1-F2$ (рис. 2, в) [22]. В поле энсиматических островных дуг расположились точки основных граувакк (66 %), базальтов (97 %) и андезитов (68 %). Риолиты (41 %), дациты (73 %) и граувакки кислого состава (60 %) в большинстве своем заняли позиции в полях энсиалических дуг и окраин андского типа.

Диаграммы $DF1-DF2$ С. Верма и Дж. Армстронга-Алтрина (рис. 2, г, д) [18] существуют в двух вариантах – отдельно для кислых и основных граувакк. Граница между этими разностями установлена авторами диаграммы по содержанию кремнезема в 63 %.

На диаграммы $DF1-DF2$ и для кислых, и для основных разностей были вынесены точки всех рассматриваемых пород. Их подавляющее большинство, независимо от содержания кремнезема, расположилось в поле островодужных обстановок.

Диаграммы М. Бхатии (не факторные) (рис. 3, а–г) [22] в своей основе имеют пять параметров. Первый – $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ является общим для всех диаграмм и откладывается по оси абсцисс, остальные четыре – индивидуальны для каждой диаграммы и откладываются по оси ординат: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$ и TiO_2 . Характеристика каждой из четырех диаграмм избыточна, поэтому ниже будут охарактеризованы вкратце и по отдельности лишь параметры, заложенные в их основу.

Основные вулканокластические граувакки улутауской свиты соответствуют осадкам акваторий энсиматических островных дуг по величинам TiO_2 , $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$ на 13, 85, 100, 92 и 99 %, соответственно. По двум последним отношениям этой же геодинамической позиции более чем на 90 % соответствуют и кислые вулканокластические граувакки, но по величинам $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ и TiO_2 они близки к осадкам энсиалических островных дуг, окраин андского типа и отчасти даже пассивным окраинам континентов.

Базальты урлядинской толщи по величинам $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$ более чем на 90 % сопоставимы с осадками энсиматических островных дуг. К этой же категории, но лишь по величинам $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$ приближаются риолиты и дациты: их состав соответствует осадкам акваторий энсиматических дуг от 73 до 95 %, тогда как по величинам $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, TiO_2 он близок к осадкам других геодинамических обстановок.

Обсуждение

Попытки разработать универсальные методы диагностики условий формирования осадков и ос-

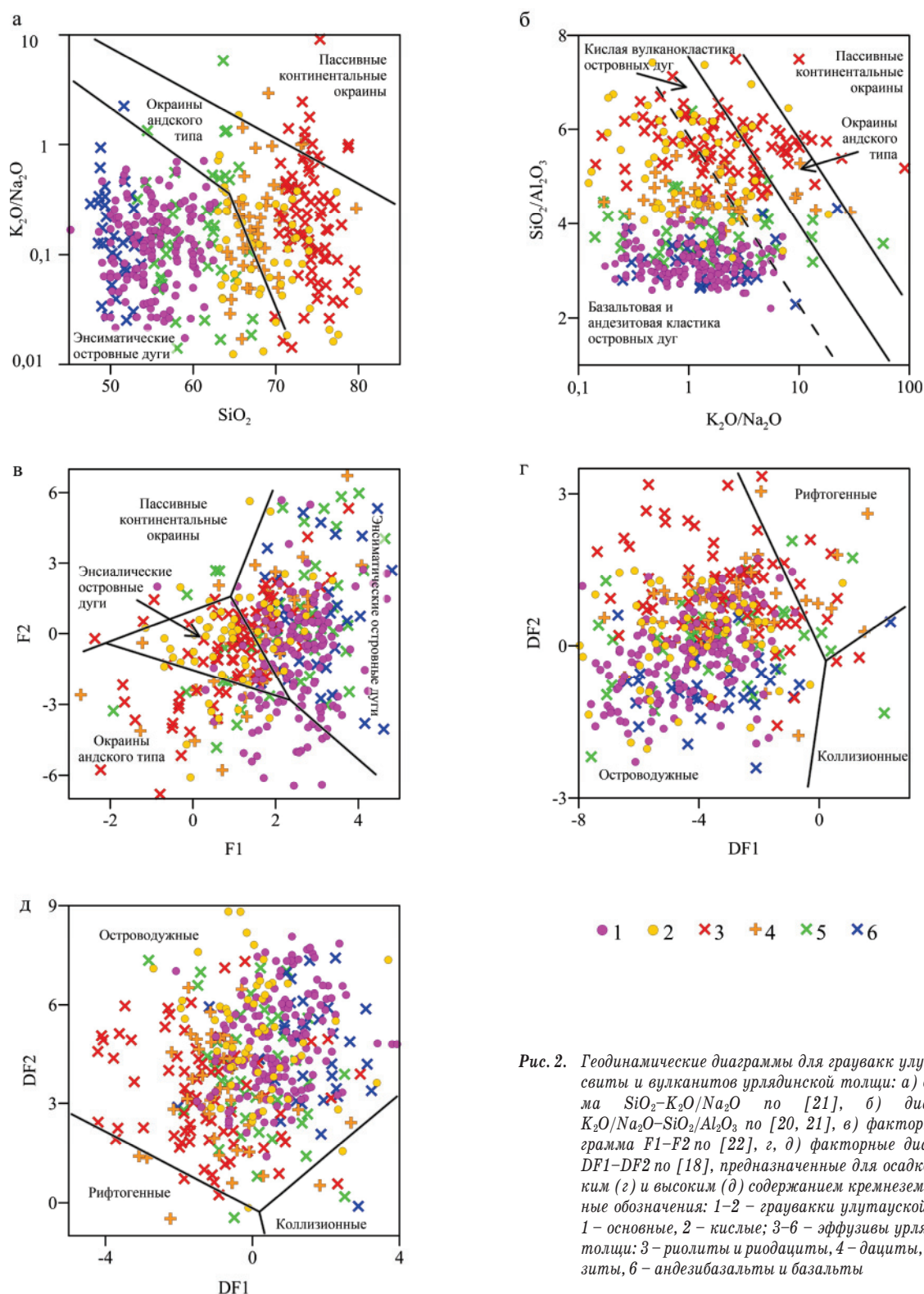


Рис. 2. Геохимические диаграммы для граувакк улутауской свиты и вулканитов урлядинской толщи: а) диаграмма $\text{SiO}_2\text{--K}_2\text{O/Na}_2\text{O}$ по [21], б) диаграмма $\text{K}_2\text{O/Na}_2\text{O--SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ по [20, 21], в) факторная диаграмма F1–F2 по [22], г, д) факторные диаграммы DF1–DF2 по [18], предназначенные для осадков с низким (г) и высоким (д) содержанием кремнезема. Условные обозначения: 1–2 – граувакки улутауской свиты: 1 – основные, 2 – кислые; 3–6 – эффузивы урлядинской толщи: 3 – риолиты и риходациты, 4 – дациты, 5 – андезиты, 6 – андезибазальты и базальты

Fig. 2. Geodynamic diagrams for graywackes of the Ulutau formation and volcanic rocks of the Urylada formation: а) diagram $\text{SiO}_2\text{--K}_2\text{O/Na}_2\text{O}$ after [21], б) $\text{SiO}_2\text{--K}_2\text{O/Na}_2\text{O}$ diagram after [20, 21], в) factor diagram F1–F2 after [22], г, д) factor diagrams DF1–DF2 after [18], intended for precipitation with low (г) and high (д) silica graywackes. Legend: 1–2 – Ulutau formation greywackes: 1 – low-silica, 2 – high-silica; 3–6 – volcanic rocks of the Urylada formation: 3 – rhyolites and rhyodacites, 4 – dacites, 5 – andesites, 6 – andesibasalts and basalts

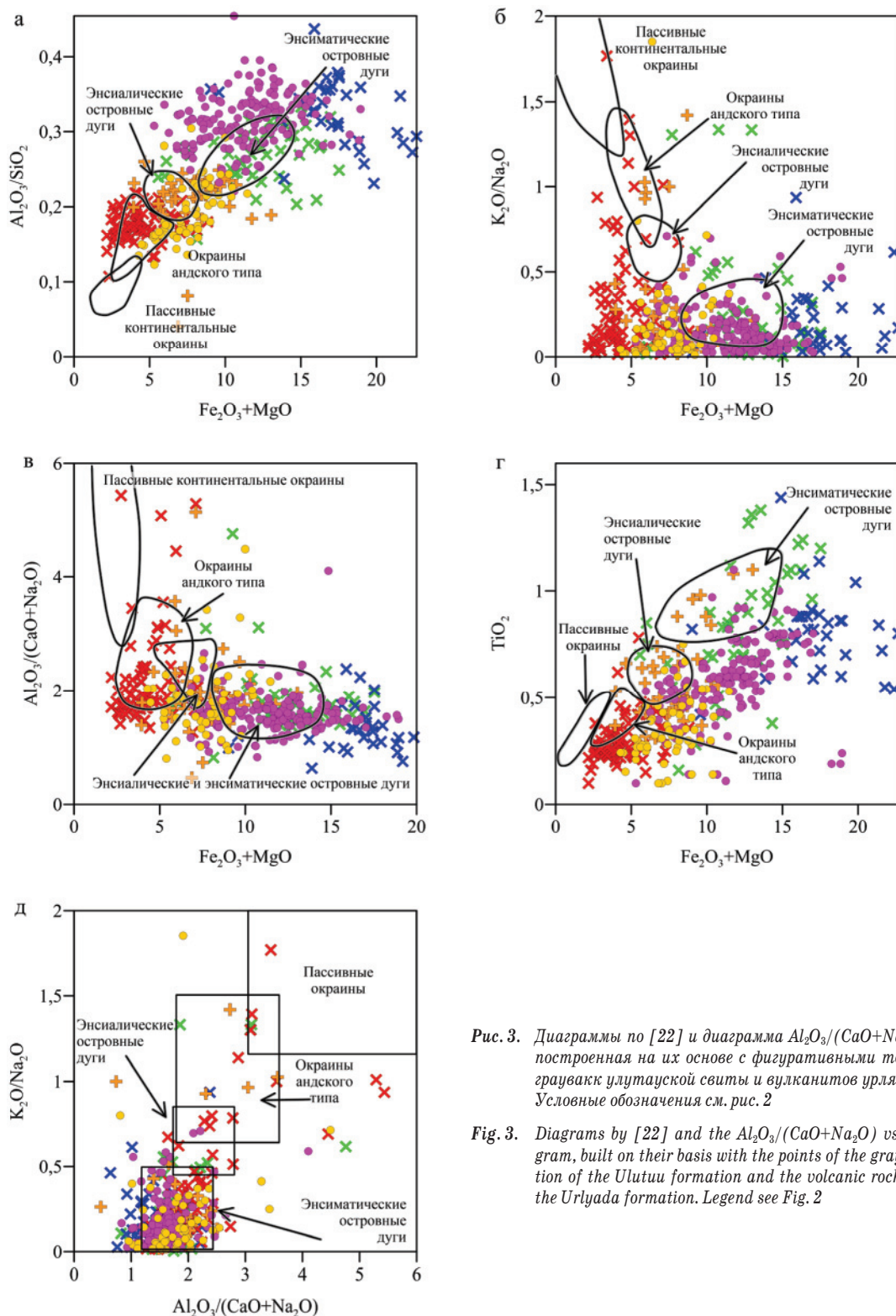


Рис. 3. Диаграммы по [22] и диаграмма $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)-K_2O/Na_2O$, построенная на их основе с фигуративными точками состава граувакк улутаской свиты и вулканитов урлядинской толщи. Условные обозначения см. рис. 2

Fig. 3. Diagrams by [22] and the $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ vs. K_2O/Na_2O diagram, built on their basis with the points of the graywackes composition of the Ulutuu formation and the volcanic rocks composition of the Urylada formation. Legend see Fig. 2

адочных пород на основе петрографических, геохимических, геофизических и других данных, на подобие рассмотренных геодинамических диаграмм, предпринимаются уже на протяжении многих десятилетий. В большинстве своем, после опробования на практике, универсальность их по-

степенно утрачивается. Причины этого подробно раскрыты В.Н. Швановым [23] на примере генетических гранулометрических диаграмм. Эти причины, по всей видимости, справедливы для всех случаев и заключаются, в частности, в том, что свойства осадков и осадочных пород зависят от множе-

ства факторов, а не только от тех, что «присутствуют» на диаграммах. Кроме этого, в седиментогенезе (в широком смысле) решающую роль играют местные условия, а это и обуславливает различия осадков, сформированных в близких палеогеографических, геохимических и прочих обстановках, но в разных районах и в разное время. Тем не менее, по мнению В.Н. Шванова, генетические диаграммы могут оказаться полезными, если анализировать расположение точек исследуемых проб друг относительно друга, а не только относительно эталонных полей.

Прямая и обратная связи состава осадков с условиями их формирования должны изучаться, а выявленные закономерности, представленные в том числе в виде генетических диаграмм, непременно должны учитываться и применяться при реконструкциях.

Первым, на что важно обратить внимание, является соответствие действительным геохимическим обстановкам состава основных вулканокластических граувакк и вулканитов аналогичного состава – андезитов и базальтов. Кислые разновидности граувакк, риолиты и дациты имеют литохимические характеристики, преимущественно собственные, исходя из представленных диаграмм, осадкам иных геохимических обстановок, вплоть до пассивных континентальных окраин. Следовательно, тефрогенные песчаники, в составе которых присутствуют кислые вулканиты, менее приемлемы для генетического анализа на основе большинства диаграмм.

Исключением можно считать лишь отношения K_2O/Na_2O и $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$, поскольку в кислых граувакках и вулканитах они близки к значениям, установленным М. Бхатией для отложений акваторий энзиматических островных дуг. Представляется целесообразным вынести их на отдельную диаграмму (рис. 3, д). Как видно, подавляющее большинство точек, отвечающих составу и кислых, и основных граувакк и вулканитов, расположилось в поле энзиматических островных дуг.

Второй особенностью, выявленной при построении диаграмм, является то, что кластеры граувакк и вулканитов практически совпадают. Следовательно, состав кластолитов не претерпел существенной трансформации при мобилизации, транспортировке и аккумуляции. Данное заключение подтверждает ранее сделанный вывод о лавинной скорости седиментации отложений улутауской свиты [12]. Помимо этого, представляется важным, что кластеры граувакк являются более компактными, по сравнению с кластерами вулканитов. По всей видимости, это объясняется смешением зерен разных вулканитов и, таким образом, приближением состава граувакк к некоторым «усредненным» параметрам.

Интересно отметить, что на многих диаграммах кластер основных граувакк мало пересекается с кластером базальтов. Вероятно, это обусловлено низкой эксплозивностью базальтовых магм и, со-

ответственно, небольшим количеством кластики, мобилизуемой при их извержении.

Исследования, близкие по своему направлению к тем, что изложены здесь, проводились неоднократно. К примеру, А.В. Масловым с коллегами [24] показано, что диаграммы Бхатии являются относительно приемлемыми для граувакковых отложений приостроводужных областей, тогда как для отложений платформенных и субплатформенных зон (кварцевые, полевошпат-кварцевые и аркозовые песчаники) наиболее пригодны диаграммы Мейнарда и Розера–Корша. Согласно [25], сомнительно применение параметров, в расчет которых входят K_2O и Na_2O из-за высокой подвижности этих элементов, а также отмечены положительные результаты применения диаграммы $(Fe_2O_3+MgO)-TiO_2$ по [22].

Как следует из наших данных, применение диаграмм Мейнарда и Розера–Корша для островодужных отложений дает хорошие результаты, а диаграммы $(Fe_2O_3+MgO)-TiO_2$, – отрицательные: в поле энзиматических дуг попало всего 13 % основных граувакк, а по отношениям K_2O/Na_2O и $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ энзиматическим островным дугам соответствуют не только основные разновидности, но и кислые. Таким образом, наши результаты не согласуются с результатами [24, 25]. Очевидно, эти несоответствия в очередной раз показывают, что все геологические объекты уникальны. Изучение каждого из них требует индивидуального подхода, а слепое применение «универсальных» методов может привести к ошибочным выводам.

В завершении интересно отметить, что помимо объективных причин, обуславливающих получение спорных результатов построения геохимических диаграмм, могут оказаться решающими и субъективные факторы. При многократном копировании из статьи в статью неминуемо появляются искажения полей диаграмм и ошибки в формулах. Например, формулы расчета дискриминантных функций $DF1$ и $DF2$ в статье [26] отличаются от первоисточника [22]. Также не совпадают формулы дискриминантной функции $DF_{(A-P)M}$ в работе [27] и в первоисточнике [28], при этом верным является первый вариант!

Выводы

Сравнительный анализ положения фигуративных точек состава тефрогенных граувакк улутауской свиты и вулканогенных пород урлядинской толщи, соответствующих их источнику сноса, сформированных в пределах энзиматической Магнитогорской островной дуги, позволил прийти к следующим результатам.

- 1) Применение основных вулканокластических граувакк $SiO_2 < 63\%$ для построения геохимических диаграмм позволяет достичь более реалистичных результатов. Точки состава кислых вулканокластических граувакк, риолитов и дацитов, сформированных в пределах энзиматической островной дуги, в большинстве своем попадают в поля энзиматических остров-

- ных дуг, окраин андского типа и отчасти пассивных континентальных окраин.
- 2) Поля граувакк практически совпадают с полями вулканитов на большинстве диаграмм. Это подтверждает ранее сделанный вывод о высокой скорости накопления отложений улутауской свиты.
 - 3) Поля граувакк, занимаемые на диаграммах, являются более компактными по сравнению с полями вулканитов, что объясняется некоторым смещением (усреднением состава) кластики, а также невысокой эксплозивностью базальтовых магм.
 - 4) Большинство проанализированных диаграмм (Мейнарда, Розера–Корша, Бхатии, Верма и Армстронга–Алтрина) может успешно применяться при изучении основных вулканокластических граувакк. Исключением служат диаграмма Бхатии ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$)– TiO_2 , на которой большинство точек и вулканитов, и песчаников не попало в какое-либо поле.
 - 5) Для изучения кислых вулканокластических граувакк могут быть использованы диаграммы DF1–DF2 по [18] и «модифицированная» диаграмма М. Бхатии $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{K}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O}$. Построение прочих диаграмм дало противоречивые результаты: большинство точек оказалось в полях, не отвечающих существовавшим в действительности геодинамическим обстановкам.
 - 6) Результаты, полученные при построении литохимических диаграмм, нельзя считать окончательными. Желательно дополнять их другими методами. Особенно это важно при изучении кластолитов, в составе которых присутствуют вулканиты кислого состава.

Исследования выполнены по теме государственного задания № 0246–2019–0118.

Автор признателен д.г.-м.н. Виктору Алексеевичу Маслову за демонстрацию большинства опробованных разрезов и Валерию Михайловичу Мосейчуку за предоставленные данные по вулканитам урядинской толщи. Особая благодарность выражается Саиде Ахметсаитовне Ягудиной – аналитику химической лаборатории ИГ УФИЦ РАН, за выполнение силикатного анализа по всем использованным образцам улутауской свиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайнуллин Р.И. Состав и особенности формирования вулканокластических отложений нижнего девона Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // Литосфера. – 2017. – Т. 17. – № 2. – С. 78–94.
2. Мельничук О.Ю., Рянская А.Д. Особенности вещественного состава аргиллитов кодинской свиты (верхний девон, восток Среднего Урала) // Литосфера. – 2017. – Т. 17. – № 3. – С. 71–86.
3. Syn-rift sandstones: the features of bulk chemical compositions, and positions on paleogeodynamic discriminant diagrams / A.V. Maslov, V.N. Podkovyrov, E.Z. Gareev, N.D. Sergeeva // Geodynamics and tectonophysics. – 2018. – V. 9. – № 1. – P. 59–80.
4. Tectonic setting discrimination diagrams for terrigenous rocks: a comparison / A.V. Maslov, V.N. Podkovyrov, G.A. Mizens, A.D. Nozhkin, A.M. Fazliakhmetov, A.I. Malinovsky, A.K. Khudoley, L.N. Kotova, A.V. Kuptsova, E.Z. Gareev, R.I. Zainullin // Geochemistry International. – 2016. – V. 54. – № 7. – P. 569–583.
5. Geochemistry of deep-sea sediments in two cores retrieved at the mouth of the Coatzacoalcos River delta, western Gulf of Mexico, Mexico / M.A. Ramos-Vázquez, J.S. Armstrong-Altrin, L. Rosales-Hoz, M.L. Machain-Castillo, A. Carranza-Edwards // Arabian Journal of Geosciences. – 2017. – 10:148.
6. Terrestrial deposition processes of Quaternary gibbsite nodules in the Yongjiang Basin, southeastern margin of Tibet, and implication for the genesis of ancient karst bauxite / S. Yang, Q. Wang, Q. Zhang, J. Chen, Y. Huang // Sedimentary Geology. – 2018. – № 373. – P. 292–306.
7. Маслов В.А., Артюшкова О.В. Стратиграфия и корреляция девонских отложений Магнитогорской мегазоны Южного Урала. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. – 288 с.
8. Мизенс Г.А. Средне- и верхнепалеозойские обломочные породы юга Урала как индикаторы палеотектонических и палеогеодинамических обстановок // Литология и геология горючих ископаемых. – Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного горного университета, 2008. – Вып. II. – № 18. – С. 183–195.
9. Фазлиахметов А.М. Условия седиментации улутауской свиты Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // Литосфера. – 2011. – № 2. – С. 42–52.
10. Широбокова Т.И. Петрохимические и геохимические особенности фаций среднедевонских обломочных пород Баймакского района // Палеовулканизм Урала. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1975. – С. 193–202.
11. Маслов В.А., Артюшкова О.В., Барышев В.Н. Стратиграфия рудовмещающих девонских отложений Сибайского района. – Уфа: БФАН СССР, 1984. – 100 с.
12. Фазлиахметов А.М. О причинах лавинной седиментации улутауской свиты Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ. – 2011. – № 1. – С. 19–21.
13. Артюшкова О.В., Маслов В.А. Палеонтологическое обоснование стратиграфического расчленения дофаменских вулканогенных комплексов Верхнеуральского и Магнитогорского районов. – Уфа: ИГ УфНЦ РАН, 1998. – 156 с.
14. Мизенс Г.А., Свяжина И.А. О палеогеографии Урала в девоне // Литосфера. – 2007. – № 2. – С. 29–44.
15. Вулканизм Южного Урала / И.Б. Серавкин, А.М. Косарев, Д.Н. Салихов, С.Е. Знаменский, З.И. Родичева, М.В. Рыкус, В.И. Сначев. – М.: Наука, 1992. – 197 с.
16. Язева Р.Г., Бочкарев В.В. Геология и геодинамика Южного Урала: (Опыт геодинамического картирования). – Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 1998. – 203 с.
17. Косарев А.М., Пучков В.Н., Серавкин И.Б. Петролого-геохимические особенности среднедевонско-раннекаменноугольных островодужных и коллизионных вулканитов Магнитогорской зоны в геодинамическом контексте // Литосфера. – 2006. – № 1. – С. 3–21.
18. Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins // Chemical Geology. – 2013. – № 355. – P. 117–133.
19. Петрографический кодекс. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования / под ред. О.А. Богатикова, О.В. Петрова. – СПб: ВСЕГЕИ, 2008. – 200 с.
20. Maynard J.B., Valloni R., Ho Shing Ju. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basin // Geological Society London Special Publications. – 1982. – V. 10. – № 1. – P. 551–561.

21. Roser B.P., Korsch R.J. Determination of tectonic settings of sandstone-mudstone suits using SiO_2 content and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio // *Journal of Geology*. – 1986. – V. 94 – № 5. – P. 635–650.
22. Bhatia M.R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstones // *Journal of Geology*. – 1983. – № 91. – P. 611–627.
23. Шванов В.Н. Песчаные породы и методы их изучения. – Л.: Недра, 1969. – 248 с.
24. Маслов А.В., Гареев Э.З., Ишерская М.В. «Стандартные» дискриминантные палеогеодинамические диаграммы и платформенные песчаниковые ассоциации // *Отечественная геология*. – 2012. – № 3. – С. 55–65.
25. Ryan K.M., Williams D.M. Testing the reliability of discrimination diagrams for determining the tectonic depositional environment of ancient sedimentary basins // *Chemical Geology*. – 2007. – № 242. – P. 103–125.
26. Armstrong-Altrin J.S., Verma S.P. Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic settings // *Sedimentary Geology*. – 2005. – № 177. – P. 115–129.
27. Zaid S.M. Petrography and geochemistry of the Middle Miocene Gebel El Rusas sandstones, Eastern Desert, Egypt: Implications for provenance and tectonic setting // *Journal of Earth System Science*. – 2017. – 126:103.
28. Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S. Geochemical discrimination of siliciclastic sediments from active and passive margin settings // *Sedimentary Geology*. – 2016. – № 332. – P. 1–12.

Поступила 18.10.2018 г.

Информация об авторах

Фазлиахметов А.М., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Лаборатории стратиграфии палеозоя Института геологии – обособленного структурного подразделения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук.

UDK 550.4+552.52 (234.853)

ON APPLICATION OF GEODYNAMIC LITHOCHEMICAL DIAGRAMS IN STUDYING TEFROGENIC SANDSTONES

Alexandr M. Fazliakhmetov,
famrb@mail.ru

Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
16/2, Karl Marks street, Ufa, 450077, Russia.

The relevance. Diagrams that allow assuming the geodynamic position of sedimentary basins on the basis of lithochemical features of clastoliths have been used for many decades. At the same time, the possibility of using them to study tefrogenic sandstones is not clear, and the results are contradictory.

The main aim of the research is a comparative analysis of the position on the most frequently used point diagrams corresponding to the composition of two groups of rocks – tefrogenic sandstones and volcanic rocks of their source.

Objects of the research are tefrogenic greywackes of the Ulutau formation and volcanic rocks (from rhyolites to basalts) of the Uralda formation of the Magnitogorsk megazone of the Southern Urals. Age of Ulutau formation is the Givetian – Early Frasnian. Genetically greywackes are tefrogenic turbidites and debrites, formed in the deep-water depression located at the foot of the oceanic Magnitogorsk island arc. In the modern erosional slice the axial zone of the island arc corresponds to the volcanics of the Uralda formation.

Methods. The comparison is based on the results of determination of the main elements content in the Ulutau formation greywackes (202 samples) and Uralda formation volcanics (202 samples). The comparison was made on the basis of the Meinard, Bhatia, Roser–Korsch and Verma–Armstrong–Altrin diagrams.

Results. The analysis of the diagrams showed that the use of the low silica volcanoclastic greywackes ($\text{SiO}_2 < 63\%$) gives more realistic results. An exception in this case is the diagram $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) - \text{TiO}_2$: most of the points turned out to be outside of any fields. Hi-silica greywackes with ($\text{SiO}_2 > 63\%$) in many diagrams fall into the fields of oceanic island arcs, active and passive continental margins. The best results for Hi-silica rocks were obtained using the DF1–DF2 diagram and the modified Bhatia $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{K}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O}$ diagram. The fields of greywacke on the majority of diagrams coincide with the fields of volcanic rocks and are more compact compared to them, which is caused by the mixed composition of sandstones and low explosiveness of basalt melts. The results obtained are largely not consistent with the results of similar studies. Consequently, the conclusions obtained when constructing lithochemical geodynamic diagrams cannot be considered as the final ones and must be supplemented by other methods.

Key words:

Geodynamic diagrams, sandstones, greywackes, oceanic island arc, the Devonian, the Magnitogorsk megazone, the Southern Urals.

Studies have been carried out on the state assignment number 0252–2014–0003.

The author is grateful to Dr. Sc. Victor A. Maslov for demonstration of the majority of the tested sections and to Valeri M. Moseychuk for the data provided on the volcanic rocks of the Uralda formation. Special thanks are expressed to Saida A. Yagudina, analyst at the chemical laboratory of the IG UFRC RAS, for performing analysis on all the used samples of the Ulutau formation.

REFERENCES

1. Zainullin R.I. Composition and distinctive features of Lower Devonian volcanoclastic sediments formation of the West-Magnitogorsk zone, the Southern Urals. *Lithosphere*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 78–94. In Rus.
2. Melnichuk O.Yu., Ryanskaya A.D. Specific composition features of Kodinka formation mudstones (Upper Devonian, Middle Urals eastern slope). *Lithosphere*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 71–86. In Rus.
3. Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Gareev E.Z., Sergeeva N.D. Syn-rift sandstones: the features of bulk chemical compositions, and positions on paleogeodynamic discriminant diagrams. *Geodynamics and tectonophysics*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 59–80.
4. Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Mizens G.A., Nozhkin A.D., Fazliakhmetov A.M., Malinovskiy A.I., Khudoley A.K., Kotova L.N., Kuptsova A.V., Gareev E.Z., Zainullin R.I. Tectonic setting discrimination diagrams for terrigenous rocks: a comparison. *Geochemistry International*, 2016, vol. 54, no. 7, pp. 569–583.
5. Ramos-Vázquez M.A., Armstrong-Altrin J.S., Rosales-Hoz L., Machain-Castillo M.L., Carranza-Edwards A. Geochemistry of deep-sea sediments in two cores retrieved at the mouth of the Coatzacoalcas River delta, western Gulf of Mexico, Mexico. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10:148.
6. Yang S., Wang Q., Zhang Q., Chen J., Huang Y. Terrestrial deposition processes of Quaternary gibbsite nodules in the Yongjiang Basin, southeastern margin of Tibet, and implication for the genesis of ancient karst bauxite. *Sedimentary Geology*, 2018, no. 373, pp. 292–306.
7. Maslov V.A., Artyushkova O.V. *Stratigrafiya i korrelyatsiya devonskikh otlozheniy Magnitogorskoy megazonoy Yuzhnogo Urala* [Stratigraphy and correlation of the Devonian deposits of the Magnitogorsk megazone of the Southern Urals]. Ufa, DesignPoligraphService Publ., 2010. 288 p.
8. Mizens G.A. Sredne- i verkhnepaleozoyskiye oblomochnyye porody yuga Urala kak indikator paleotektonicheskikh i paleogeodinamicheskikh obstanovok [Middle and Upper Paleozoic detrital rocks of the south of the Urals as indicators of paleotectonic and paleogeodynamic settings]. *Litologiya i geologiya goryuchikh iskopayemykh* [Lithology and geology of combustible minerals]. Ekaterinburg, Ural State Mining University Publ. house, 2008. Vol. 2, no. 18. pp. 183–195.
9. Fazliakhmetov A.M. Sedimentary environments of the Ulutau suite in the West-Magnitogorsk zone of the South Urals. *Lithosphere*, 2011, no. 2, pp. 42–52. In Rus.
10. Shirobokova T.I. Petrokhimicheskie i geokhimicheskie osobennosti fatsiy srednedevonskikh oblomochnykh porod Baymaksogo rayona [Petrochemical and geochemical features of the facies of the Middle Devonian clastic rocks of the Baymak region]. *Paleovulkanizm Urala* [Paleovolcanology of the Urals]. Sverdlovsk, Ural USSR Academy of Sciences Publ., 1975. pp. 193–202.

11. Maslov V.A., Artyushkova O.V., Baryshev V.N. *Stratigrafiya rudomeshchayushchikh devonskikh otlozheniy Sibayskogo rayona* [Stratigraphy of ore-bearing Devonian deposits of Sibay district]. Ufa, BFAN USSR Publ., 1984. 100 p.
12. Fazliakhmetov A.M. About reasons of avalanche sedimentation of the Ulutau formation in the West-Magnitogorsk zone of the Southern Urals. *Bulletin of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center*, 2011, no. 1, pp. 19–21. In Rus.
13. Artyushkova O.V., Maslov V.A. *Paleontologicheskoe obosnovanie stratigraficheskogo raschleneniya dofamenskikh vulkanogennykh kompleksov Verkhneuralskogo i Magnitogorskogo rayonov* [Paleontological substantiation of the stratigraphic dismemberment of the prefamenian volcanogenic complexes of the Upper Ural and Magnitogorsk regions]. Ufa, IG UFSC of RAS Publ., 1998. 156 p.
14. Mizens G.A., Svyazhina I.A. On the Urals Devonian paleogeography. *Lithosphere*, 2007, no. 2, pp. 29–44. In Rus.
15. Seravkin I.B., Kosarev A.M., Salikhov D.N., Znamensky S.E., Rodichesva Z.I., Rykus M.V., Snachev V.I. *Vulkanizm Yuzhnogo Urala* [Volcanism of the Southern Urals]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 197 p.
16. Yazeva R.G., Bochkarev V.V. *Geologiya i geodinamika Yuzhnogo Urala (Opyt geodinamicheskogo kartirovaniya)* [Geology and geodynamics of the Southern Urals (Experience of geodynamic mapping)]. Ekaterinburg, IGG UB RAS Publ., 1998. 203 p.
17. Kosarev A.M., Puchkov V.N., Seravkin I.B. Petro-geochemical features of Middle Devonian-Early Carboniferous island-arc and collision volcanics of the Magnitogorsk zone in the geodynamic context. *Lithosphere*, 2006, no. 1, pp. 3–21. In Rus.
18. Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins. *Chemical Geology*, 2013, no. 355, pp. 117–133.
19. *Petrograficheskiy kodeks. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnyye obrazovaniya* [Petrographic Code. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations]. Eds. O.A. Bogatkov, O.V. Petrov. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2008. 200 p.
20. Maynard J.B., Valloni R., Ho Shing Ju. 1982. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basin. *Geological Society London Special Publications*, vol. 10, no. 1, pp. 551–561.
21. Roser B.P., Korsch R.J. Determination of tectonic settings of sandstone-mudstone suits using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *Journal of Geology*, 1986, vol. 94, no. 5, pp. 635–650.
22. Bhatia M.R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstones. *Journal of Geology*, 1983, no. 91, pp. 611–627.
23. Shvanov V.N. *Peschanye porody i metody ikh izucheniya* [Sand rocks and methods for their study]. Leningrad, Nedra Publ., 1969. 248 p.
24. Maslov A.V., Gareev E.Z., Isherskaya M.V. «Standard» discriminant paleogeodynamic diagrams and platform sandstone associations. *Otechestvennaya geologiya*, 2012, no. 3, pp. 55–65. In Rus.
25. Ryan K.M., Williams D.M. Testing the reliability of discrimination diagrams for determining the tectonic depositional environment of ancient sedimentary basins. *Chemical Geology*, 2007, no. 242, pp. 103–125.
26. Armstrong-Altrin J.S., Verma S.P. Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic settings. *Sedimentary Geology*, 2005, no. 177, pp. 115–129.
27. Zaid S.M. Petrography and geochemistry of the Middle Miocene Gebel El Rusas sandstones, Eastern Desert, Egypt: Implications for provenance and tectonic setting. *Journal of Earth System Science*, 2017, 126:103.
28. Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S. Geochemical discrimination of siliciclastic sediments from active and passive margin settings. *Sedimentary Geology*, 2016, no. 332, pp. 1–12.

Received: 18 October 2018.

Information about the authors

Alexandr M. Fazliakhmetov, Cand. Sc, senior researcher, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences.

УДК 66.096.5:662.7

СЖИГАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ И РЕАЛЬНЫХ НЕФТЕШЛАМОВ В КИПАЮЩЕМ СЛОЕ КАТАЛИЗАТОРА

Дубинин Юрий Владимирович¹,
dubinin@catalysis.ru

Языков Николай Алексеевич¹,
yazykov@catalysis.ru

Симонов Александр Дмитриевич¹,
simonov@catalysis.ru

Яковлев Вадим Анатольевич¹,
yakovlev@catalysis.ru

¹ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 5.

Актуальность исследования обусловлена ежегодным образованием огромного количества нефтяных отходов (в основном нефтяных шламов и кислых гудронов). Развитие технологий переработки такого вида сырья является актуальным направлением исследования для многих научных коллективов. Несмотря на значительный вред для окружающей среды, отходы нефтепереработки заключают в себе огромный энергетический потенциал, в связи с чем необходимо создавать технологии, которые будут сочетать в себе как экологически чистую утилизацию, так и эффективное использование этого потенциала. На данный момент существует множество различных по своей природе способов утилизации рассматриваемых материалов. Основным из них является прямое сжигание отходов. Тем не менее практически все существующие подходы являются дорогостоящими и сложными в реализации. Кроме того, большинство из них не обеспечивают требуемой экологической безопасности процесса.

Цель: демонстрация применимости метода сжигания в кипящем слое катализатора к процессу эффективной утилизации отходов нефтепереработки.

Объекты: смеси нефть/вода различного соотношения компонентов, моделирующие отходы, образующиеся в результате процессов нефтепереработки (добычи, хранения, переработки в товарные продукты). Кроме того, исследованы образцы реальных отходов нефтепереработки – нефтешламы различного происхождения.

Методы: анализ литературных источников на предмет определения основных подходов к утилизации отходов нефтепереработки, используемых на практике; физические эксперименты по определению зольности, влажности и содержания летучих компонентов в исследуемых образцах; физический эксперимент по сжиганию модельных и реальных нефтяных отходов.

Результаты. Проведен анализ существующих методов термической переработки с достаточно подробным рассмотрением отдельных методов, применяемых на практике. Кроме того, была проведена серия физических экспериментов по сжиганию как модельных смесей нефть/вода в различном соотношении, так и реальных нефтяных шламов различного происхождения. Авторами работы показано, что сжигание как модельных, так и реальных нефтешламов в условиях кипящего слоя катализатора обеспечивает высокую экологическую безопасность процесса – содержание вредных выбросов (CO , NO_x , SO_2) не превышает уровень в 100 ppm. Кроме того, исследования показали возможность реализации автотермического режима горения рассматриваемых отходов, что позволяет максимально эффективно использовать их энергетический потенциал.

Ключевые слова:

Отходы нефтепереработки, сжигание, катализ, кипящий слой, автотермический режим, экологическая безопасность.

Введение

Одной из проблем, требующих к себе все больше внимания, является образование огромного количества отходов нефтепереработки (включающих в себя отходы добычи, хранения и транспортировки нефти), а именно необходимость их утилизации. Такие отходы являются одним из крупнейших источников загрязнения окружающей среды и оказывают серьезное негативное влияние как на экосистему в целом, так и на здоровье человека в частности [1–3]. В основном к отходам нефтепереработки относятся так называемые нефтяные шламы (НШ) и кислые гудроны (КГ). Состав данных продуктов нефтепереработки не является постоянной величиной, а варьируется в зависимости от многих факторов, таких как: конкретные условия добычи нефти, условия ее хранения, а также от

специфики ее залегания в недрах. Тем не менее основными группами компонентов, составляющих отходы нефтепереработки, являются: нефтепродукты, вода, минеральные компоненты и механические примеси.

В зависимости от конкретных условий и вышеперечисленных факторов содержание в отходах нефтепереработки нефтепродуктов может варьироваться в пределах до 70 %, содержание воды – до 85 %, содержание минеральных компонентов и механических примесей – до 50 %. Как можно видеть, разброс данных показателей весьма высок и, к сожалению, не может давать четких представлений о той или иной составляющей нефтяных отходов.

По своему происхождению нефтяные отходы можно подразделить на несколько типов:

- грунтовые – нефтепродукт, попавший в почву и пропитавший ее;
- природные – образующиеся в процессе оседания тяжелых компонентов нефти, например, на дно водоемов;
- резервуарного типа – образующиеся при хранении и транспортировке нефтепродуктов в цистернах, танках и других емкостях;
- отходы, образующиеся при добыче нефти – вещества, отделенные от сырой нефти вместе с механическими примесями, водой, минеральными солями и т. д.

По мнению экспертов и согласно существующим статистическим данным, от 3 до 5 % всей добываемой в мире нефти уходит в отходы нефтепереработки и нефтедобычи [4–6]. Более 60 млн т отходов образуется в мире каждый год [7]. В Российской Федерации ежегодно образуется более 3 млн т нефтяных шламов и от 220 до 250 тыс. т кислых гудронов. Среди источников таких отходов можно выделить: нефтедобычу (более 1 млн т), нефтепереработку (порядка 0,7 млн т), нефтяные терминалы (около 0,3 млн т), а также другие источники: транспорт, аэропорты, морские порты и т. д. (около 0,5 млн т).

Проблемы утилизации НШ связаны с высоким содержанием в них воды (до 80 %) и зольностью (до 50 %). Утилизация кислых гудронов, содержащих значительные количества серной кислоты и олеума, методом прямого сжигания не приемлема из-за высоких выбросов SO_2 .

Обзор методов утилизации

Несмотря на значительные объемы образующихся нефтяных отходов, их разнообразие требует индивидуального подхода к их утилизации. На настоящий момент существует несколько способов обезвреживания и переработки нефтяных отходов [8–10]:

- Термический способ, включающий в себя различные виды сжигания, сушку либо пиролиз.
- Химический способ, заключающийся в затвердевании путем диспергирования с гидрофобными реагентами на основе негашеной извести или других материалов.
- Биологический способ – различные варианты биоразложения отходов путем введения в них бактерий, биогенных добавок и т. п.
- Физический способ, основанный на применении таких методов, как гравитационное отстаивание, разделение в центробежном поле, разделение фильтрованием и экстракция.
- Физико-химический способ, состоящий в применении специально подобранных поверхностно-активных веществ (деэмульгаторов, диспергаторов, смачивателей и т. д.).

Наиболее эффективным и универсальным, хотя и не всегда экономически рентабельным, считается термический метод обезвреживания нефтяных отходов [11–19]. Существует множество видов термической утилизации. Так, например, одним

из таких способов является сжигание в печах барабанного типа [12, 13]. Печь барабанного типа представляет собой цилиндрическую ёмкость, слегка наклонённую по горизонтали, которая медленно вращается вокруг своей оси. Вещество, которое будет обрабатываться, подаётся в верхнюю часть барабана. В то время как печь вращается, вещество плавно опускается и подвергается перемешиванию. Горячие газы проходят по печи в прямоточном направлении либо, чаще всего, в противоточном. Горячие газы могут появляться в выносной топке либо образуются от внутреннего пламени в печи. Это пламя выходит из трубы форсунки (печной форсунки). Барабанные печи могут иметь перегревающие и теплообменные устройства, а также специальные устройства для подачи твердых и газообразных материалов в отдельные зоны печи через отверстия в кожухе.

Один из примеров установок для сжигания нефтяных отходов, основанных на применении барабанной печи, описан в [12]. Описанная установка предназначена для утилизации путем сжигания нефтешламов, замазученных грунтов, нефтесодержащих отходов, образующихся при аварийных разливах нефти и нефтепродуктов, отработанных масел, в т. ч. растительного происхождения. На установке допускается утилизация отходов с содержанием нефти и нефтепродуктов в шламе не более 30 %. При более высоком содержании нефтепродукта необходимо понизить его концентрацию добавлением в него грунта (песка). Процесс сжигания нефтесодержащих отходов проводится при рабочей температуре 600–800 °C. Температура отходящих газов в атмосферу составляет 100–110 °C. Сжигание отходов проводится в присутствии большого избытка воздуха.

К достоинствам данного способа следует отнести сравнительно низкий температурный диапазон проведения процесса сжигания, позволяющий снизить выброс токсичных веществ в атмосферу. Функционирование в данном диапазоне также снижает требования к используемым конструкционным материалам. Недостатком данной технологии является повышенное потребление энергетических ресурсов (вследствие использования обводненных нефтеотходов). Кроме того, процесс требует использования больших избытков воздуха. При этом конечный продукт переработки не находит дальнейшего применения [12].

Другим способом сжигания нефтяных отходов, используемых в настоящее время, является сжигание в различных печах (чаще всего камерных) с использованием форсунок для подачи топлива в печь. Так, на заводе «НижегородГИПРОнефтехим» была разработана технологическая схема сжигания нефтяных отходов [14]. Согласно данной схеме, нефтяные отходы предварительно отстаиваются в специальной емкости для удаления избыточной воды и, частично, остатков нефтепродуктов. Отстоявшиеся отходы перемешиваются и подаются в усреднительные емкости, в которых под-

держивается их постоянный состав и происходит нагрев до 60–80 °С. Затем через ротационную форсунку отходы поступают в печь, где при температуре 1000–1200 °С происходит полное сгорание органической части.

Широкое применение также находит сжигание в топках с барботажными горелками [15]. Барботаж подразумевает под собой продувку через слой топлива газообразного агента, например, воздуха. В горелках барботажного типа функции распыливающего устройства выполняет пенный слой. Все пространство распыливания в них можно разделить на три зоны: зону пенного слоя, где происходит распределение обводненного топлива в потоке «первичного» воздуха в виде тонких пленок, разделяющих воздушные пузырьки; зону формирования капель, в которой происходит разрушение пенного слоя; зону стабилизации, представляющую собой сформировавшуюся область дисперсного состава жидкого топлива в постоянной концентрации капелек топлива в потоке подаваемого сюда «вторичного» воздуха. Барботаж воздуха или горючего газа через слой нефтепродуктов способствует повышению эффективности процессов тепломассообмена. В процессе горения обводненный слой жидких нефтеотходов в барботажной ванне, через который продувается «первичный» воздух, прогревается до температуры кипения. Взаимодействие образующихся горючих паров с кислородом происходит в зоне горения над слоем, куда непрерывно должны поступать горючие пары и вторичный воздух. Тепло от зоны горения к поверхности нефтеотходов передается посредством конвекции и теплового излучения.

Недостатком всей технологии является дорогостоящая система очистки газов, образующихся в ходе процесса, поскольку сжигание предварительно не очищенных масел сопровождается образованием большого количества золы и высокотоксичных отходящих газов (монооксид углерода, углеводороды, оксиды серы).

Еще одним вариантом термической утилизации нефтяных отходов является сжигание в печах с кипящим слоем теплоносителя [16, 17]. Печь с кипящим слоем представляет собой вертикальный цилиндрический реактор, в котором находятся частицы оживаемого материала. Процесс псевдооживления происходит благодаря восходящему потоку воздуха, подаваемому в нижнюю часть реактора. В слой кипящего материала сверху либо через боковые отверстия подается сжигаемое вещество. Через отверстие в верхней части реактора происходит вынос отходящих газов и продуктов процесса горения. В общем виде процесс сжигания отходов в установках с кипящим слоем теплоносителя представлен на рис. 1.

В мировой практике ведущими компаниями, использующими технологию сжигания топлив и отходов в кипящем слое теплоносителя, являются: «Lurgi AG» (Германия), «Ebara» (Япония), «Foster Wheeler» (США). Однако в большинстве своем тех-

нологии данных компаний направлены на переработку и утилизацию мусора и твердых бытовых отходов и не находят широкого применения в термической переработке нефтяных отходов.

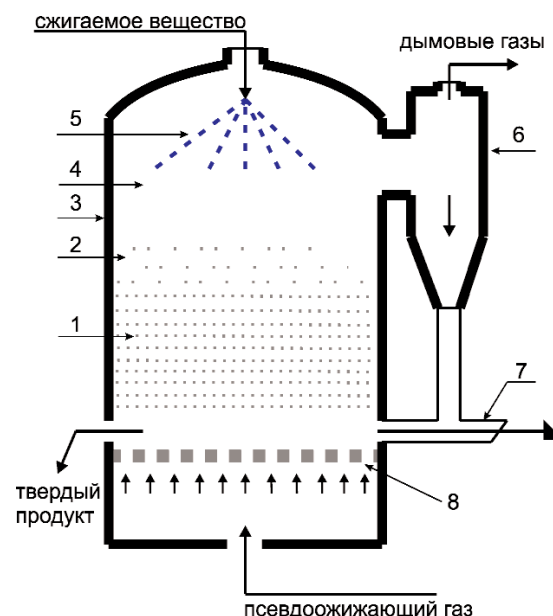


Рис. 1. Схема работы печи с псевдооживленным слоем: 1 – плотная фаза оживленного слоя; 2 – разбавленная фаза оживленного слоя; 3 – печь; 4 – распыленный загруженный материал; 5 – камера; 6 – циклонный сепаратор; 7 – труба для возврата материалов; 8 – газораспределительная решетка

Fig. 1. Scheme of the fluidized bed furnace: 1 is the dense phase of the fluidized bed; 2 is the diluted phase of the fluidized bed; 3 is the furnace; 4 is the sprayed feedstock; 5 is the chamber; 6 is the cyclone separator; 7 is the tube for materials returning; 8 is the gas distribution grid

В России на предприятиях нефтеперерабатывающей промышленности было построено несколько печей с кипящим слоем для сжигания нефтешламов. Одна из таких установок эксплуатировалась на Уфимском НПЗ. Печь представляла собой вертикальный цилиндрический аппарат, футерованный изнутри огнеупорным кирпичом диаметром 2,6 м, высотой 8 м. В качестве материала для создания кипящего слоя применялся кварцевый песок с размером фракции 0,8 мм, высота слоя составляла 800–1000 м. Температура кипящего слоя рекомендовалась в пределах 600 °С, подогрев его осуществлялся топливными форсунками, расположенными как в слое, так и под слоем. Псевдооживление слоя песка создавалось холодным воздухом. Эксплуатация данной печи привела к отрицательным результатам. Причиной этому послужило то, что предварительно подогретый до 600 °С слой песка периодически остывал до 400–450 °С. При данной температуре в слое песка горение прекращалось, шли процессы крекинга и коксования, т. е. газификация шлама, что приводило к образованию коксовых агломератов и закупориванию кипящего слоя [15]. В то же время при

правильном выборе объекта обезвреживания и соблюдении технологических режимов печи кипящего слоя работают надежно и эффективно.

Технология сжигания нефтяных отходов в кипящем слое теплоносителя имеет безусловные преимущества перед слоевым или факельным горением топлив по своей эффективности и количеству токсичных выбросов. Однако и в этом случае содержание токсичных примесей в дымовых газах заметно превышает санитарные нормы.

Как видно, существует множество способов термической переработки нефтяных отходов. Однако все они обладают существенными недостатками, среди которых можно отметить: несоответствие современным экологическим требованиям к токсичности выбросов, производимых в процессе сжигания, и требованиям к энергосбережению; экономическая нерентабельность эксплуатации установок; ограничения по типу и свойствам сжигаемых отходов; высокие требования к используемым материалам при создании установок; высокие требования к обслуживанию; неэффективность сжигания отходов и другие. Рассматриваемая в данной работе технология сжигания нефтяных отходов в кипящем слое катализатора устраняет практически все недостатки существующих способов сжигания, обладает значительными преимуществами и на сегодняшний день не имеет аналогов, как в Российской Федерации, так и за рубежом.

Материалы и методы

Анализ исходного углеводородного сырья

Для исходного сырья и продуктов окисления определялись: плотность, зольность, влажность, элементный состав, количество летучих компонентов.

Плотность определялась при помощи ареометра (ГОСТ 3900–85).

Содержание в исходных нефтешламах и сырой нефти таких элементов, как сера, водород, азот и углерод, определяли на приборе CHNS элементный анализатор VARIO EL CUBE производства фирмы Elementar Analysensysteme GmbH, Germany. Принцип действия анализатора основан на каталитическом сжигании при высокой температуре предварительно взвешенной анализируемой пробы, очистке, осушке, адсорбционном разделении продуктов сгорания, и последующем детектировании катарометром.

Дополнительно, для экспресс-определения содержания серы, применялся метод рентгенофлуоресцентного анализа на анализаторе ARL-Advant'x с Rh – анодом рентгеновской трубки (ГОСТ Р 51947–2002). Принцип метода заключается в том, что испытуемый образец помещается в пучок лучей, испускаемых источником рентгеновского излучения. Затем измеряются характеристики энергии возбуждения от рентгеновского излучения и сравниваются полученные сигналы счетчика импульсов с сигналами счетчика, полученными при испытании заранее подготовленных калибровочных образцов.

Зольность образцов до сжигания определялась согласно ГОСТ 1461–75 (Нефть и нефтепродукты. Метод определения зольности). Сущность данного метода заключается в том, что пробу топлива сжигают в муфельной печи, нагреваемой с определенной скоростью до температуры 775 ± 25 °С, и выдерживают при этой температуре до постоянной массы. Зольность в процентах рассчитывают по массе остатка после прокалывания, согласно формуле:

$$A = \frac{m_1 - m_2}{m} \cdot 100,$$

где m – масса испытуемого продукта, г; m_1 – масса золы, г; m_2 – масса золы двух бумажных фильтров, г.

Содержание воды в исходных образцах определялось одноступенчатым методом по ГОСТ Р 52911–2008. Навеску пробы высушивают в сушильном шкафу при 105–110 °С в атмосфере воздуха до постоянной массы. Массовую долю воды рассчитывают по потере массы навески, согласно формуле:

$$W_t = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100,$$

где m_1 – масса пустого бюкса с крышкой, г; m_2 – масса бюкса с крышкой и пробой до сушки, г; m_3 – масса бюкса с крышкой и пробой после сушки, г.

Содержание нефтепродуктов в рабочей массе нефтешламов определялось из общей массы нефтешлама за вычетом массы воды и зольного компонента.

Анализ газообразных продуктов окисления углеводородного сырья

Продукты сжигания топлив в кипящем слое катализатора можно разделить на две составляющие – газообразные продукты сжигания и зола. Анализ отходящих газов производился при помощи газоанализатора «ПОЛАР», соответствующего ГОСТ Р 50759–95. Принцип действия газоанализатора основан на применении комплекта электрохимических и оптических датчиков для измерения содержания газовых компонент анализируемой пробы, термоэлектрического преобразователя (термопары) типа «К» для измерения температуры газового потока, дифференциального полупроводникового датчика для измерения избыточного давления (разрежения) и в комплекте с пневмометрической напорной трубкой типа Пито или НИ-ИОГАЗ для определения скорости и объемного расхода газового потока. Прибор предназначен для определения концентрации таких газов, как кислород, CO₂, CO, NO и NO₂, SO₂, а также углеводородов.

Анализ твердых продуктов окисления углеводородного сырья

Для твердых продуктов окисления углеводородного сырья определялись такие характеристики, как зольность, степень выгорания, элементный состав.

Зольность продуктов окисления определялась по ГОСТ 11022–95, аналогично случаю анализа исходного углеводородного сырья.

Исходя из значения зольности сырья и зольности конечного продукта окисления, определялась степень выгорания органической составляющей сырья. Степень выгорания горючей массы топлива определялась по формуле:

$$\beta(\%) = 10000(A_{\text{ост}}^c - A_0^c) / A_{\text{ост}}^c (100 - A_0^c),$$

где A_0^c – исходная зольность сухого топлива, %; $A_{\text{ост}}^c$ – зольность сухого остатка, %.

Как и в случае с исходным углеводородным сырьем, элементный анализ продуктов окисления осуществлялся при помощи рентгенофлуоресцентного анализа.

Катализатор глубокого окисления для кипящего слоя

Для исследования сжигания реальных и модельных нефтешламов в реакторе кипящего слоя был использован катализатор ШКЗ-1. Катализатор представляет собой шариковый гамма-оксид алюминия с нанесенными на поверхность оксидами меди и хрома (активный компонент). Предшественники активного компонента были нанесены методом пропитки исходного носителя по влажности. Состав и характеристики катализатора приведены в табл. 1.

Таблица 1. Состав и характеристики катализатора

Table 1. Composition and characteristics of the catalyst

Катализатор Catalyst	Удельная поверхность, м ² /г Specific surface, m ² /g	Объем пор, см ³ /г Pore volume, cm ³ /g	Диаметр пор, Å Pore diameter, Å	Элементный состав Elemental composition	Фазовый состав Phase composition
ШКЗ-1 ShchKZ-1	115	0,30	105	6,5 % Cr ₂ O ₃ 3,5 % CuO	CuCr ₂ O ₄ , (следы/ traces) γ-Al ₂ O ₃

Сжигание топлив в кипящем слое катализатора

Для сжигания в кипящем слое катализатора жидких топлив, таких как тяжелая высокосернистая нефть и нефтешламы, в работе использовалась установка, представленная на рис. 2. Из специальной емкости при помощи насоса топливо через боковое отверстие в нижней части, продуваемое воздухом, подается в реактор с кипящим слоем, диаметром 40 мм. Кроме того, установка оснащена узлом подачи твердого связующего соединений серы из бункера в реактор при помощи шнекового дозатора.

Результаты и обсуждение

Проводилось исследование сжигания модельного нефтешлама, а также промышленных нефтешламов, образующихся при переработке нефти на Рязанском нефтеперерабатывающем заводе (РНПЗ). Исследовались два типа шламов – шлам из шламонакопителя плавающий (ШНП) и шлам из нефтеловушки (ШНЛ).

Смесь, моделирующая нефтяной шлам, была приготовлена путем смешивания тяжелой высокосернистой нефти и воды в соотношении 1:1. При помощи диспергатора ULTRA TURRAX T25 BASIC (IKA-WERKE, Германия) смесь переводилась в устойчивую однородную по объему эмульсию. В реактор эмульсия подавалась через форсунку, в которую параллельно дозировалась вода для варьирования ее содержания в конечной смеси на входе в реактор. Сжигание модельной смеси проводилось в автотермическом режиме при 700 °С. Такие условия позволяют определить возможность проведения автотермического сжигания такого вида сырья при различной исходной влажности.

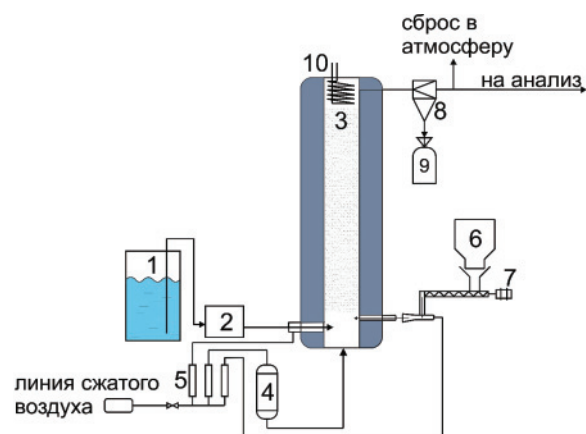


Рис. 2. Установка для сжигания жидких топлив в кипящем слое катализатора: 1 – емкость с жидким топливом; 2 – насос; 3 – реактор; 4 – воздухонагреватель; 5 – ротаметры; 6 – бункер с твердым связующим; 7 – шнековый дозатор; 8 – циклон; 9 – емкость для сбора золы; 10 – теплообменник

Fig. 2. Installation for combustion of liquid fuels in a fluidized bed of catalyst: 1 is the tank with liquid fuel; 2 is the pump; 3 is the reactor; 4 is the heater; 5 are the rotameters; 6 is the tank with solid absorbent; 7 is the screw feeder; 8 is the cyclone; 9 is the ash collector; 10 is the heat exchanger

Сжигание нефтяного сырья проводилось на установке, представленной на рис. 2. В реактор, снабженный организующей насадкой, загружался катализатор глубокого окисления ШКЗ-1 (CuCr₂O₄/γ-Al₂O₃) с размером сферических частиц 1,2–1,4 мм в количестве 500 см³. В качестве катализатора глубокого окисления для процесса был выбран именно ШКЗ-1, поскольку данный катализатор проявляет максимальное значение каталитической активности в отношении окисления СО, являющегося основным вредным выбросом, образующимся при горении нефтяного сырья.

Состав использовавшихся в работе нефтешламов и модельной смеси представлен в табл. 2.

При сжигании модельной смеси и нефтешламов в кипящем слое катализатора ШКЗ-1 при 700 °С в отходящих газах продуктов недожога не наблюдалось. Кроме того, содержание токсичных веществ в отходящих газах, таких как NO, NO₂, SO₂, находилось на незначительном уровне (рис. 3).

Таблица 2. Состав нефтяного сырья

Table 2. Oil feedstock composition

Сырье Feedstock	Содержание воды Water content, W_p	Зольность рабочей массы Ash content, A^p	Нефтепродукты в рабочей массе, НПР Oil products content
	%		
Модельная смесь Model mixture	50,0–80,0	0	20,0–50,0
ШНП Floating sludge	80,5	0,6	18,9
ШНЛ Oil trap sludge	86,3	4,9	8,8

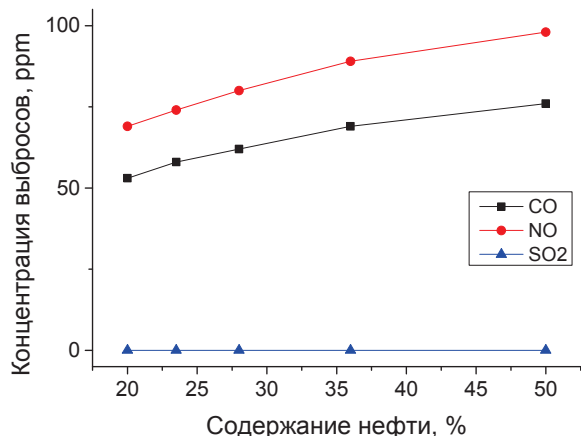


Рис. 3. Результаты сжигания модельного нефтешлама при 700 °C в автотермическом режиме

Fig. 3. Results of model oil sludge combustion at 700 °C in autothermal mode

Из полученных данных видно, что при увеличении содержания нефти в модельном нефтешламе растет уровень выбросов CO и NO_x. Это обусловливается большим количеством органического сырья, проходящим через реактор в единицу времени. Тем не менее количество образующихся оксидов азота и CO не превосходит предельно допустимые значения для данных процессов. Количество SO₂ на выходе из реактора остается близким к нулю вследствие эффективного связывания образующихся оксидов серы с оксидами, входящими в состав катализатора [20].

Для каждого соотношения нефть/вода и для реальных нефтешламов была определена величина степени выгорания. Степень выгорания нефтешламов при 700 °C составила 99,6 % для ШНП, 99,4 % – для ШНЛ и 99,8 % – для модельной смеси нефть/вода. Таким образом, можно утверждать, что процесс сжигания нефтешламов в кипящем слое катализатора протекает с высокой эффективностью в отношении полезного использования органической составляющей топлива.

Полученные в результате исследований данные были использованы для расчета оптимальных

условий сжигания реальных нефтешламов в установках кипящего слоя катализатора. Расчет теплового баланса показал, что при сжигании ШНП в системе будет происходить выделение дополнительной теплоты (свыше количества, необходимого для реализации автотермического режима горения) в количестве 505 ккал на 1 кг сжигаемого продукта. Поэтому при сжигании ШНП необходимо обеспечить отвод избытка теплоты. В случае сжигания ШНЛ для обеспечения температурного режима 700 °C необходимо добавочное топливо. При использовании, например, нефти с теплотворной способностью 9800 ккал/кг расход нефти составит 0,024 кг на 1 кг сжигаемого нефтешлама. При совместном сжигании шламов возможно создание автотермического режима без дополнительного топлива, при этом весовое соотношение ШНП/ШНЛ=0,46. Данное соотношение соответствует средней влажности 80–85 % и калорийности 900–1000 ккал/кг.

Таким образом, сжигание в кипящем слое катализатора таких некондиционных видов топлива, как нефтяные шламы, является не только высокоэффективным, но и экологически безопасным. Реализация данного процесса позволит не только решить проблему утилизации образующихся в огромном количестве нефтяных отходов, обеспечив при этом необходимую экологическую безопасность процесса, но и совместить процесс утилизации с получением рабочего тепла от сжигания.

Заключение

Таким образом, разработанная в Институте катализа СО РАН технология сжигания топлив и отходов в псевдоожиженном слое катализатора может быть эффективно применена для экологически безопасного сжигания отходов нефтедобычи и нефтепереработки. Приведенные в работе результаты показывают, что наряду с высокой степенью выгорания исходного нефтяного сырья содержание в дымовых газах CO, NO_x, SO_x не превышает санитарных норм.

Сжигание модельного обводненного нефтешлама в кипящем слое катализатора возможно в автотермическом режиме горения при содержании воды до 80 % с достижением степени выгорания 99,8 %. При сжигании промышленных нефтешламов при 700 °C показана возможность реализации автотермического режима при влажности 80–85 % и калорийности 900–1000 ккал/кг. При этом обеспечивается 99,5 % степени выгорания, а содержание CO, оксидов азота и SO₂ в отходящих газах не превышает 100 ppm, что существенно ниже, чем ПДВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 17-73-30032).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Morsali S. A novel perspective to bitumen refineries life cycle assessment and processes emissions // *Acta Ecologica Sinica*. – 2018. – V. 38. – Iss. 3. – P. 242–247.
2. Gupta A.K., Ahmad I., Ahmad M. Genotoxicity of refinery waste assessed by some DNA damage tests // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2015. – V. 114. – P. 250–256.
3. Toxicity Assessment of Carbon Black Waste: A by-Product from Oil Refineries / X. Zhen, W.C. Ng, Fendy, Y.W. Tong, Y. Dai, K.G. Neoh, C.-H. Wang // *J. Hazard. Mater.* – 2017. – V. 321. – P. 600–610.
4. Хаустов А.П., Редина М.М. Экологические проблемы оценки образования нефтешламов при авариях // *Экологический вестник России*. – 2011. – № 8. – С. 34–37.
5. Шлапаков А.В. Утилизация нефтешлама в Венесуэле // *Экология производства*. – 2012. – № 7. – С. 81–85.
6. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. – М.: Ин-октаво, 2005. – 368 с.
7. Enrichment and characterization of hydrocarbon-degrading bacteria from petroleum refinery waste as potent bioaugmentation agent for in situ bioremediation / P. Sarkar, A. Roy, S. Pal, B. Mohapatra, S.K. Kazy, M.K. Maiti, P. Sar // *Bioresource Technology*. – 2017. – V. 242. – P. 15–27.
8. Красногорская Н.Н., Магид А.Б., Трифонова Н.А. Утилизация нефтяных шламов // *Нефтегазовое дело*. – 2004. – Т. 2. – С. 217–222.
9. Speight J., El-Gendy N.S. Introduction to Petroleum Biotechnology. 1st ed. – Houston: Gulf Professional Publishing, 2017. – 566 p.
10. Fink J. Guide to the Practical Use of Chemicals in Refineries and Pipelines. 1st ed. – Houston: Gulf Professional Publishing, 2016. – 266 p.
11. Мазлова Е.А., Мещеряков С.В. Проблемы утилизации нефтешламов и способы их переработки. – М.: Ноосфера, 2001. – 56 с.
12. Лагутенко М.А. Направления совершенствования технологии термического обезвреживания нефтесодержащих отходов // *Научный журнал КубГАУ*. – 2013. – № 93. – С. 1–14.
13. Сжигание нефтешламов и активных илов на НПЗ: Тем. обз. / В.В. Фрязинов, Б.И. Брондз, В.А. Расветалов и др. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1985. – 64 с.
14. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. Т. 3. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. – 1024 с.
15. Пальгунов П.П., Сумароков М.В. Утилизация промышленных отходов. – М.: Стройиздат, 1990. – 352 с.
16. Пономарев В.Г., Иоакимис Э.Г., Монгайт И.Л. Очистка сточных вод нефтеперерабатывающих заводов. – М.: Химия, 1985. – 256 с.
17. Баскаков А.П., Мацнев В.В., Распопов И.В. Котлы и топки с кипящим слоем. – М.: ЭАИ, 1995. – 350 с.
18. Испытания горелочного устройства беспламенного горения и инфракрасного излучения / С.В. Долгов, А.С. Загорин, А.Ю. Долгих, А.Н. Субботин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 39–42.
19. Adánez J., Abad A. Chemical-looping combustion: Status and research needs // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2018. – V. 37. – № 4. – P. 4303–4317.
20. Features of Sulfur Oils Catalytic Combustion in Fluidized Bed / N.A. Yazykov, Y.V. Dubinin, A.D. Simonov, S.I. Reshetnikov, V.A. Yakovlev // *Chemical Engineering Journal*. – 2016. – V. 283. – P. 649–655.

Поступила 16.11.2018 г.

Информация об авторах

Дубинин Ю.В., кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории каталитических процессов переработки возобновляемого сырья Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН.

Языков Н.А., кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории каталитических процессов переработки возобновляемого сырья Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН.

Симонов А.Д., кандидат химических наук, ведущий инженер-технолог лаборатории каталитических процессов переработки возобновляемого сырья Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН.

Яковлев В.А., доктор химических наук, заместитель директора по научной работе Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН.

UDC 66.096.5:662.7

COMBUSTION OF MODEL AND REAL OIL SLUDGE IN A FLUIDIZED BED OF CATALYST

Yury V. Dubinin¹,
dubinin@catalysis.ru

Nikolay A. Yazykov¹,
yazykov@catalysis.ru

Alexander D. Simonov¹,
simonov@catalysis.ru

Vadim A. Yakovlev¹,
yakovlev@catalysis.ru

¹ Boreskov institute of catalysis SB RAS,
5, Academician Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the research is caused by generation of a huge amount of oil refinery waste (mainly oil sludge and acid tars). The development of technologies for processing such type of raw materials is an important area for many research teams. Despite the significant harm to the environment, refining waste contains a huge energy potential. Therefore, it is necessary to create technologies that will combine both environmentally friendly recycling and effective use of this potential. Now, there are many different ways of such materials utilization. The main one is direct combustion. However, almost all existing approaches are expensive and difficult in their implementation. In addition, most of them do not provide the required environmental safety of the process.

The main aim of the research is to demonstrate the applicability of the fluidized bed combustion method for efficient refinery waste utilization.

Objects of the research are the oil/water mixtures of various component ratio modeling waste resulting from refining processes (production, storage, processing into commodity products). In addition, samples of real oil refining waste (oil sludge of various origin) were investigated.

Methods: analysis of literary sources in order to determine the main approaches to oil waste utilization; physical experiments to determine ash, moisture and volatile content in the samples; physical experiment on combustion of model and real oil waste.

Results. The paper analyzes the existing methods of thermal processing with a sufficiently detailed consideration of individual methods used in practice. In addition, a series of physical experiments on combustion of both model oil/water mixtures in various ratios and real oil sludges of various origin was carried out. The authors showed that the combustion of both model and real sludge under conditions of a fluidized bed of catalyst provides a high environmental safety of the process – the content of harmful emissions (CO, NO_x, SO₂) does not exceed 100 ppm. In addition, the studies have shown the possibility of implementing the autothermal mode of combustion, which allows one to use their energy potential in most efficient way.

Key words:

Oil sludge, combustion, catalysis, fluidized bed, autothermic mode, ecological safety.

The research was financially supported by the RSF (project no. 17–73–30032).

REFERENCES

1. Morsali S. A novel perspective to bitumen refineries life cycle assessment and processes emissions. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, vol. 38, Iss. 3, pp. 242–247.
2. Gupta A.K., Ahmad I., Ahmad M. Genotoxicity of refinery waste assessed by some DNA damage tests. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, vol. 114, pp. 250–256.
3. Zhen X., Ng W.C., Fendy, Tong Y.W., Dai Y., Neoh K.G., Wang C.-H. Toxicity Assessment of Carbon Black Waste: A by-Product from Oil Refineries. *J. Hazard. Mater.*, 2017, vol. 321, pp. 600–610.
4. Khaustov A.P., Redina M.M. Environmental problems of assessing the formation of oil sludge during accidents. *Ecological Bulletin of Russia*, 2011, no. 8, pp. 34–37. In Rus.
5. Shlapakov A.V.. Utilizatsiya nefteshlama v Venesuele [Utilization of oil sludge in Venezuela]. *Ekologiya proizvodstva*, 2012, no. 7, pp. 81–85.
6. Vorobiev Yu.L., Akimov V.A., Sokolov Yu.I. *Preduprezhdenie i likvidatsiya avariynnykh razlivov nefi i nefteproduktov* [Prevention and elimination of accidental spills of oil and oil products]. Moscow, In-octavo Publ., 2005. 368 p.
7. Sarkar P., Roy A., Pal S., Mohapatra B., Kazy S.K., Maiti M.K., Sar P. Enrichment and characterization of hydrocarbon-degrading bacteria from petroleum refinery waste as potent bioaugmentation agent for in situ bioremediation. *Bioresource Technology*, 2017, vol. 242, pp. 15–27.
8. Krasnogorskaya N.N., Magid A.B., Trifonova N.A. Utilizatsiya neftyanykh shlamov [Utilisation of oil sludge]. *Neftegazovoe delo*, 2004, vol. 2, pp. 217–222.
9. Speight J., El-Gendy N.S. *Introduction to Petroleum Biotechnology*. 1st ed. Houston, Gulf Professional Publishing, 2017. 566 p.
10. Fink J. *Guide to the Practical Use of Chemicals in Refineries and Pipelines*. 1st ed. Houston, Gulf Professional Publishing, 2016. 266 p.
11. Mazalova E.A., Mesheryakov S.V. *Problemy utilizatsii nefteshlamov i sposoby ikh pererabotky* [Problems of sludge utilization and methods for their processing]. Moscow, Noosfera, 2001. 56 p.
12. Lagutenko M.A. Directions for improving the technology of oily waste thermal disposal. *Scientific journal of KubSAU*, 2013, no. 93, pp. 1–14. In Rus.
13. Fryazinov V.V., Brondz B.I., Rasvetalov V.A. *Szhiganie nefteshlamov i aktivnykh ilov na NPZ: Tem. obz.* [Combustion of oil

- sludge and activated sludge at refineries: Topics. Reviews]. Moscow, TSNIITEneftekhim Publ., 1985. 64 p.
14. Timonin A.S. *Inzhenerno-ekologichesky spravochnik* [Engineering-ecological Handbook]. Kaluga, N. Bochkareva Publ. House, 2003. Vol. 3, 1024 p.
 15. Palgunov P.P., Sumarokov M.V. *Utilizatsiya promyshlennykh otkhodov* [Industrial waste utilization]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1990. 352 p.
 16. Ponomarev V.G., Ioakimis E.G. Mongait I.L. *Ochistka stochnykh vod neftepererabatyvayushchikh zavodov* [Wastewater treatment of refineries]. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 256 p.
 17. Baskakov A.P., Mantsev V.V., Raspopov I.V. *Kotly i topki s kishchichim sloem* [Fluidized bed boilers and furnaces]. Moscow, EAI Publ., 1995. 350 p.
 18. Dolgov S.V., Zavorin A.S., Dolgikh A.Yu., Subbotin A.N. Tests of burner device of flameless combustion and infra-red radiation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 39–42. In Rus.
 19. Adánez J., Abad A. Chemical-looping combustion: Status and research needs. *Proc. of the Combustion Institute*, 2018, vol. no. pp. 1–15.
 20. Yazykov N.A., Dubinin Y.V., Simonov A.D., Reshetnikov S.I., Yakovlev V.A. Features of Sulfur Oils Catalytic Combustion in Fluidized Bed. *Chemical Engineering Journal*, 2016, vol. 283, pp. 649–655.

Received: 16 November 2018.

Information about the authors

Yury V. Dubinin, Cand. Sc., researcher, Boreskov institute of catalysis SB RAS.

Nikolay A. Yazykov, Cand. Sc., researcher, Boreskov institute of catalysis SB RAS.

Alexander D. Simonov, Cand. Sc., engineer, Boreskov institute of catalysis SB RAS.

Vadim A. Yakovlev, Dr. Sc., Deputy Director, Boreskov institute of catalysis SB RAS.

УДК 556.3.06

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ В ЦЕЛЯХ ОСУШЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АЛМАЗОВ ИМ. В. ГРИБА

Еланцева Людмила Алексеевна¹,
LAElanceva@novotek15.ru

Зайцев Денис Александрович¹,
Zden86@yandex.ru

Фоменко Сергей Викторович¹,
SVFomenko@rambler.ru

¹ ООО НТЦ «НОВОТЭК»,
Россия, 308002, г. Белгород, пр. Б. Хмельницкого, 131.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью вовлечения в промышленное использование весьма сложного в гидрогеологическом отношении месторождения алмазов, на котором добыча руды осуществляется с проведением крупных мероприятий по водопонижению, направленных на создание безопасных условий производства горных работ. Прогнозирование управляемого водопонижения и изменения гидрогеологических условий при эксплуатации месторождения является сложной задачей, требует учета многих природных и горнотехнических факторов и разработки методических приемов ее решения.

Цель: разработка методики и выполнение гидрогеологических прогнозов для эффективного осушения при эксплуатации месторождения алмазов им. В. Гриба.

Объекты: осушаемые водоносные горизонты и дренажная система карьера.

Методы: анализ применения численных методов моделирования для исследования процессов фильтрации при осушении месторождений полезных ископаемых, численное моделирование.

Результаты. На основе изучения геолого-гидрогеологических условий месторождения алмазов им. В. Гриба, способа отработки, выделенных осушаемых водоносных подразделений и источников формирования водопритоков к дренажной системе карьера создана численная модель фильтрации подземных вод. Рекомендовано для перехвата части проскока подземных вод в карьер, дренажа падунского водоносного комплекса на участках, где осушение не обеспечивается ВПС, осушение переходной зоны падунских и мезенских отложений осуществлять внутрикарьерными дренажными устройствами. Предложена методика реализации на численной модели внутрикарьерных дрен. Выполнены прогнозные расчеты с целью эффективного осушения месторождения. Методом численного моделирования доказана эффективность применения лучевого дренажа и горизонтальных дренажных скважин для интенсификации осушения падунских отложений в прибортовом массиве карьера, выполнен прогнозный расчет высоты высачивания на бортах карьера с учетом плана развития карьера. Предложены сроки сооружения внутрикарьерных дренажных устройств.

Ключевые слова:

Управляемое водопонижение, водопонижающие поверхностные скважины, карьерный водоотлив, гидрогеологические прогнозы, численное моделирование, лучевой дренаж, горизонтальные дренажные скважины.

Введение

В практике гидрогеологического прогнозирования условий осушения месторождений полезных ископаемых, как правило, применяются численные методы моделирования, являющиеся на современном этапе исследований основными методами изучения процессов фильтрации при решении сложных гидрогеологических задач в области осушения месторождений [1–17].

Достоверность и надежность гидрогеологического прогноза зависит от корректности гидрогеологической схематизации и обеспечивается при решении задач осушения месторождений выполнением трех общих принципов: непрерывности осуществления схематизации по мере накопления информации, адаптации расчетных схем, обратной связи схематизации с природными и горнотехническими особенностями изучаемого месторождения [18–20].

Моделирование реализует все три указанных принципа схематизации, позволяет с максимальной эффективностью использовать весь объем

имеющейся информации о месторождении в рамках единой численной математической модели.

Гидрогеологическая схематизация осуществляется таким образом, чтобы наряду с идентификацией математической модели данным режимных наблюдений за уровнями подземных вод и водопритоками к дренажной системе карьера обеспечивался инженерный запас в прогнозных оценках.

Краткая характеристика месторождения алмазов им. В. Гриба

Месторождение алмазов им. В. Гриба (кимберлитовая трубка) перекрыто толщей среднекаменноугольных терригенно-карбонатных пород и рыхлых четвертичных отложений суммарной мощностью 50–80 м и прорывает осадочные терригенные породы рифея и венда мощностью порядка 1150 м [21, 22].

Кимберлитовая трубка представляет собой вертикальную залежь с ярко выраженными контурами кратерной и жерловой частей. Кратер диаметра

мы сложен песчаниками с примесью кимберлитового материала, туфопесчаниками, туфами, туф-фитами, брекчиями осадочных пород, в нижней части содержит маломощные инъекции кимберлитов. Жерло трубки выполнено туфобрекчиями, ксенотуфобрекчиями и кимберлитами.

В геологическом разрезе четко выделяют два структурных этажа: архей-нижнепротерозойский кристаллический фундамент (гнейсы, амфиболиты, гранатосодержащие гнейсо-граниты) и осадочный чехол, сложенный преимущественно терригенными образованиями рифея и венда, в меньшей степени карбонатными и терригенными осадками палеозоя и кайнозоя. Мощность осадочного чехла варьирует от 3–4 км в понижениях дорифейского рельефа до 0,5–1,1 км на возвышенных участках.

Гидрогеологические условия характеризуются распространением на локальной площади водоносных горизонтов четвертичного возраста и повсеместным развитием мощной толщии моноклиналино залегающих водоносных горизонтов палеозойского и верхнепротерозойского возраста.

Четвертичные подразделения развиты преимущественно в палеодолинах и депрессиях дочетвертичного рельефа в песчано-глинистых морских, ледниковых, флювиогляциальных и озерно-аллювиальных отложениях с коэффициентом фильтрации от 0,01 до 2,3 м/сут.

Палеозойские подразделения представлены среднекаменноугольными карбонатными образованиями безнапорного олмугско-окуневского горизонта и слабонапорными обводненными песчаниками урзугско-воереченского комплекса.

Олмугско-окуневский водоносный горизонт распространен в карбонатных породах (известковистые доломиты, доломиты) повсеместно, за исключением эрозионной впадины, линейно вытянутой вдоль озер Черное, Волчьи, суммарной мощностью от 11 до 26 м.

Урзугско-воереченский водоносный комплекс приурочен к терригенным породам (аргиллиты, алевропесчаники, песчаники) мощностью обводненной толщии от 20 до 46 м, размыт в долине р. Кукомка – оз. Черное.

Среднекаменноугольные отложения отличаются относительно высокими фильтрационными свойствами: коэффициент фильтрации 2–10 м/сут и более.

Верхнепротерозойские подразделения представлены высоконапорными терригенными отложениями падунской и мезенской свит венда.

Падунский водоносный комплекс залегает в мелко- и среднезернистых песчаниках с прослоями аргиллитов и алевролитов. Водопроницаемость отложений характеризуется значениями 209–238 м²/сут, коэффициент фильтрации 1,2–1,8 м/сут.

Мезенский слабоводоносный комплекс приурочен к аргиллитам, алевролитам и песчаникам, обладает слабой водообильностью: водопроницаемость пород изменяется в пределах 5,3–11,4 м²/сут, коэффициент фильтрации – 0,02–0,04 м/сут.

На месторождении принят поверхностный способ обработки, при котором осушению подвергается вся толща пород, залегающих над рабочим пластом: олмугско-окуневский и урзугско-воереченский водоносные горизонты, падунский и мезенский водоносные комплексы. К настоящему времени (2018 г.) карьером вскрыты среднекаменноугольные и падунские отложения, вскрытие мезенских образований намечается в 2019 г.

Водопритоки к дренажной системе карьера формируются за счет подземных вод и атмосферных осадков в зоне с активной гидравлической взаимосвязью подземных и поверхностных вод.

Разработка месторождения осуществляется под защитой дренажного контура водопонижающих скважин (ВПС) и карьерного водоотлива.

Контурный ряд водопонижающих скважин насчитывает 75 скважин, оборудованных на падунский водоносный комплекс, и 11 скважин, сооруженных в долине осушенной части озера Черного и оборудованных на четвертичный водоносный горизонт и верхнюю часть падунского водоносного комплекса. Водопонижающие скважины, как правило, обладают относительно высокой производительностью (70–120 м³/ч), лишь в отдельных скважинах дебит составляет менее 50 м³/ч.

В настоящее время суммарный объем дренажных вод, откачиваемый водопонижающими скважинами, изменяется в пределах 5000–7000 м³/ч, объем дренажных вод, отбираемых системой карьерного водоотлива – от 700 до 1000 м³/ч. Общй водоотбор составляет 5900–7600 м³/ч.

Численная модель фильтрации подземных вод

Для управляемого водопонижения на карьере разработана численная гидродинамическая модель фильтрации подземных вод, которая учитывает все основные технологические элементы дренажной системы, расположение объекта в зоне активного водообмена подземных и поверхностных водных объектов, данные по выявленным геологическим и гидрогеологическим особенностям месторождения.

Моделирование проводилось с использованием лицензионной программы MODFLOW системы GMS, реализующей пространственную фильтрацию подземных вод методом конечных разностей в многослойной толще для области произвольной конфигурации при наличии фильтрационных неоднородностей в плане и разрезе, инфильтрации (испарения). Программа позволяет определять уровни и понижения уровней подземных вод в каждой узловой точке области фильтрации для каждого слоя, расходы подземных вод в граничных точках изучаемой области, составляющие баланс подземных вод, автоматически управлять работой граничных условий.

Водоносная толща пород реализована в расчетной модели как многослойная, состоящая из четырех слоев. Верхний слой представлен четвертичными озерно-аллювиальными песчано-глинистыми

ми отложениями и карбонатными олмуго-окуневскими образованиями. Ко второму слою отнесены урзугско-воереченские песчаники с прослоями аргиллитов. Третий слой включает падунские песчаники с прослоями аргиллитов и алевролитов. За нижний слой принят слабоводоносный мезенский комплекс, представленный аргиллитами и алевролитами с прослоями песчаников.

В соответствии с проведенной схематизацией гидрогеологические условия района характеризуются нестационарным режимом фильтрации пространственного напорно-безнапорного потока подземных вод в многослойном пласте, состоящем из четырех слоев, отличающихся различными фильтрационными параметрами.

Фильтрационный поток исследуемой области моделировался неравномерной прямоугольной сеткой с переменным шагом, изменяющимся от 10 до 100 м, состоящей из 119952 (336×357) ячеек.

На внешних границах моделируемой области было реализовано ГУ I рода с абсолютными отметками, соответствующими статическому положению уровней подземных вод наиболее водообильного падунского водоносного комплекса (76–115 м), граница проходит за пределами воронки депрессии на расстоянии 6–8 км от контура карьера.

Гидродинамическое несовершенство условий питания или разгрузки подземного потока реками Кукомка, Падун, Ерна и протока Черная учитывалось введением вдоль его русла ГУ III рода с абсолютными отметками уреза воды через дополнительное фильтрационное сопротивление. Отметки дна рек определялись как разница отметок уреза рек и средней их глубины, принятой равной 1 м. При расчете дополнительного сопротивления на реках принимались следующие параметры: коэффициент фильтрации подрусловых отложений равным 0,1–0,01 м/сут, их мощность – 5–10 м, ширина рек – 6–12 м.

Условия питания или разгрузки подземного потока из озер реализовывались на модели ГУ III рода с поддержанием уровня подземных вод на абсолютной отметке, отвечающей отметке фактического заполнения водоема, через дополнительное фильтрационное сопротивление. При расчетах дополнительного сопротивления по площади озер коэффициент фильтрации донных глинистых отложений принимался равным 0,01 м/сут при средней их мощности 5–10 м.

Условия питания подземного потока из хвостохранилища реализовывались на модели ГУ III рода с поддержанием уровня в прудках на абсолютных отметках, отвечающих средним отметкам фактического заполнения отсеков хвостохранилища за расчетный период, через дополнительное фильтрационное сопротивление.

Определение величины дополнительного фильтрационного сопротивления в каждом конкретном случае выполнялось с учетом вида несовершенства границы по общепринятой в моделировании методике [4, 20].

Работа водопонижающих скважин реализована на модели ГУ II рода в соответствии с фактическими данными о среднем водоотборе скважин за расчетный период с учетом несоответствия размеров водопонижающей скважины и блока сеточной модели [23], изменением фильтрационных свойств горных пород в прифильтровой части скважины [20].

Условия разгрузки подземного потока устройствами карьерного водоотлива реализовывались на модели заданием ГУ III рода по отметкам, соответствующим абсолютной отметке подошвы вскрытой части отложений, через дополнительное фильтрационное сопротивление, учитывающее высоту высачивания на бортах карьера.

Инфильтрационное питание атмосферными осадками задавалось равным 0,0003–0,0016 м/сут, исходя из подземного стока порядка 20 % от среднесуточной интенсивности атмосферных осадков, равной 570 мм в год, что соответствует 0,0016 м/сут.

Калибровка модели осуществлялась методом решения обратной задачи, основной целью которой является достижение максимально возможного соответствия построенной фильтрационной модели исследуемому гидрогеологическому объекту: установление соответствия гидрогеологических процессов, протекающих на изучаемом месторождении, их модельным реализациям.

Обратная задача решалась для двух характерных состояний исследуемой гидродинамической системы:

- квазистационарного режима фильтрации подземных вод в период до августа 2012 г.;
- нарушенного режима фильтрации подземных вод в условиях производственного водопонижения за период август 2012 г. – декабрь 2017 г.

В процессе идентификации модели выявлен характер гидравлической связи водоносного комплекса с речными и озерными долинами, определены участки питания и разгрузки водоносных пластов, фильтрационные потери из хвостохранилища Верхотинского ГОКа.

В процессе моделирования установлено, что река Кукомка в нижней части питает водоносные пласты. Инфильтрационные потери из реки составляют 1000 м³/ч. Реки Падун, Ерна и верхняя часть р. Кукомки дренируют подземные воды, в реки разгружается 1800 м³/ч подземных вод. Инфильтрация из Волчьих озер достигает 1100 м³/ч. Фильтрационные потери из озер Черное, Северные и Южные Басурманы не превышают 700 м³/ч. Потери на фильтрацию из хвостохранилища составляют порядка 2000 м³/ч.

Прогнозные расчеты для эффективного осушения месторождения

Падунские обводненные отложения характеризуются неоднородным литологическим составом, наличием неустойчивых зон слабосцементированных песчаников, находящихся в состоянии, близком к плавунным пескам.

Сложные гидрогеологические условия месторождения способствовали отставанию процесса осушения от темпов развития горных работ в карьере, формированию бортов карьера в недоосушенной зоне падунских отложений.

Для перехвата части проскока подземных вод в карьер, дренажа падунского водоносного комплекса на участках, где осушение не обеспечивается ВПС, осушение переходной зоны падунских и мезенских отложений предлагается осуществлять горизонтальными дренажными скважинами, сооружаемыми из карьера непосредственно в откос уступа борта карьера или из предварительно пройденного дренажного колодца.

С использованием актуализированной гидродинамической модели проведено прогнозное численное моделирование с целью доказательства принципиальной возможности и эффективности применения системы лучевого дренажа и горизонтальных дренажных скважин в стенку откоса борта карьера для интенсификации процесса осушения падунских отложений в прибортовом массиве карьера. Следует отметить, что до настоящего времени в условиях карьеров Архангельской алмазоносной провинции горизонтальные дренажные скважины для осушения водоносных отложений не применялись.

Оценка водопритоков подземных вод к дренажной системе карьера выполнена при вводе системы

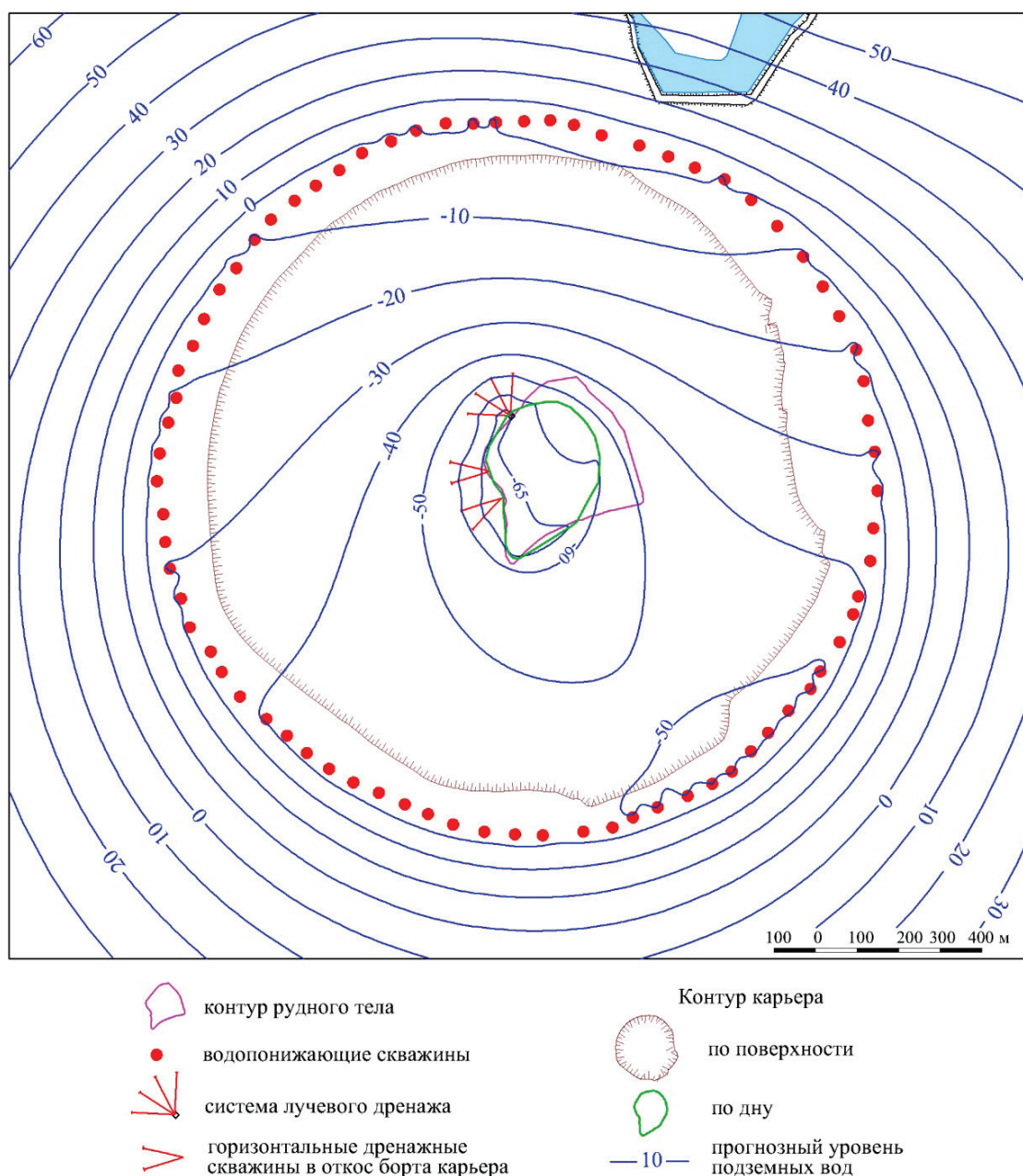


Рис. 1. Карта прогнозного распределения уровня подземных вод падунского водоносного горизонта на 01.07.2018 г.

Fig. 1. Map of the prognostic distribution of the groundwater level of the Padun aquifer as of 01.07.2018.

лучевого дренажа (дренажный колодец с 4 лучевыми скважинами длиной по 150 м) и горизонтальными дренажными скважинами в стенку откоса борта карьера (4 скважины длиной по 150 м).

Предложена методика реализации на численной модели внутрикарьерных дрен. Условия разгрузки подземного потока внутрикарьерными устройствами реализовывались на модели заданием ГУ III рода с поддержанием уровня подземных вод на абсолютной отметке, отвечающей глубине заложения лучевого дренажа и горизонтальных дренажных скважин в откос борта карьера, через дополнительное фильтрационное сопротивление, учитывающее несовершенство стока на плановой модели и несоответствие размеров блока модели и радиуса скважины.

Дополнительное фильтрационное сопротивление, учитывающее несовершенство стока на плановой модели, рассчитывалось по зависимости [20]

$$\Phi_d = \frac{1}{4\pi k} \left(\frac{\frac{1}{r_c} + \frac{1}{2z_0} - \frac{2}{m} \ln m}{r_c} + \Delta\Phi_d \right),$$

где k – коэффициент фильтрации; r_c – радиус скважины; z_0 – расстояние от подошвы пласта до отметки заложения горизонтальной скважины; m – мощность пласта; $\Delta\Phi_d$ – дополнительное сопротивление на несоответствие размеров блоков Δx , Δy и радиуса скважины, определяемое по формуле [23]

$$\Delta\Phi_d = \frac{1}{km} \left(\frac{1}{2\pi} \ln \sqrt{\frac{\Delta x \Delta y}{r_c}} - 0,25 \right).$$

Результаты прогнозного моделирования приводятся в табл. 1 и на рис. 1, 2.

Таблица 1. Прогнозные водоприток к дренажной системе карьера

Table 1. Prognostic water inflows to the drainage system of the quarry

Месяц/Months	Водоприток, м³/ч Water inflow, m³/hr				Водоотбор, м³/ч Water withdrawal, m³/hr	
	к лучевому дренажу to radiation drainage	к горизонтальным дренажным скважинам to horizontal drainage wells	к карьерному водоотливу to career dewatering	Суммарный Total	ВПС external drainage circuit	Суммарный Total
2	259	129	575	963	6850	7813
4	247	119	597	963		7813
6	238	111	614	963		7813
8	230	104	635	969		7819
10	223	97	657	977		7827
12	216	91	680	987		7837

По данным моделирования прогнозные водоприток к лучевому дренажу изменяется в пределах 259–216 м³/ч, к горизонтальным дренажным скважинам – 129–91 м³/ч, к карьерному водоотливу – от 963 до 987 м³/ч. Общий водоприток к системе дренажа карьера (с ВПС) не превысит 7840 м³/ч.

Анализ результатов моделирования показывает, что использование внутрикарьерных дренажных устройств приводит к значительному снижению (на 20–25 м) высоты высачивания на борту карьера в зоне влияния дренажа, наблюдается снижение уровня подземных вод падунского водоносного горизонта на 2,5–10,0 м в районе внешнего дренажного контура ВПС.

С использованием гидродинамической модели выполнен прогнозный расчет высоты высачивания на бортах карьера с учетом развития карьера в плане и разрезе. Максимальная высота высачивания, при которой возможна потеря устойчивости борта карьера, составляет 75 м.

Прогнозное моделирование проводилось по двум вариантам:

- 1) водоотбор ВПС $Q=6850$ м³/ч по средней производительности за 2017 г.;
- 2) водоотбор ВПС $Q=6500$ м³/ч по прогнозной производительности, допускающей уменьшение величины водоотбора.

В каждом варианте расчеты выполнялись по двум подвариантам:

- а) коэффициент фильтрации падунских отложений по всей толще $k=1,6$ м/сут;
- б) коэффициент фильтрации падунских отложений в верхней части $k=1,6$ м/сут, в нижней части (мощность около 20 м) – $k=0,8$ м/сут.

Результаты прогнозных расчетов высоты высачивания на откосах карьера приводятся в табл. 2.

Таблица 2. Прогнозная высота высачивания на откосах карьера
Table 2. Prognostic height of seepage on the slopes of the quarry

Дата Date	Отметка дна карье- ра, м абс. Mark of the quarry bottom, m abs.	Водопиток к карьерному водоотливу, м³/ч Water inflow to quarry drainage, m³/hr				Высота высачивания, м Seizure height, m			
		Вариант расчета/Variant of calculation							
		1а (1a)	1б (1b)	2а (2a)	2б (2b)	1а (1a)	1б (1b)	2а (2a)	2б (2b)
01.01.2019	–115	950	840	1030	900	60	70	70	75
01.06.2019	–125	1000	900	1090	970	65	73	73	78

Анализ результатов моделирования показывает, что при отработке карьера до отметки –125 м абс. (варианты 1б и 2а) высота высачивания на бортах карьера на 2 м ниже критического значения, при отработке карьера до отметки –115 м абс. (вариант 2б) она достигнет критического значения, а при отработке карьера до отметки –125 м абс. превысит критическое значение на 3 м.

В данных расчетах принято залегание подошвы падунских отложений по условной границе с отметкой –125 м абс. Если граница окажется ниже, то достижение высоты высачивания значения 75 м может быть достигнуто в первой половине 2019 г., а это предполагает, что технические мероприятия по сооружению внутрикарьерных дренажных устройств должны быть реализованы во второй половине 2018 г., чтобы не допустить опасного наращивания высоты высачивания подземных вод в карьере.

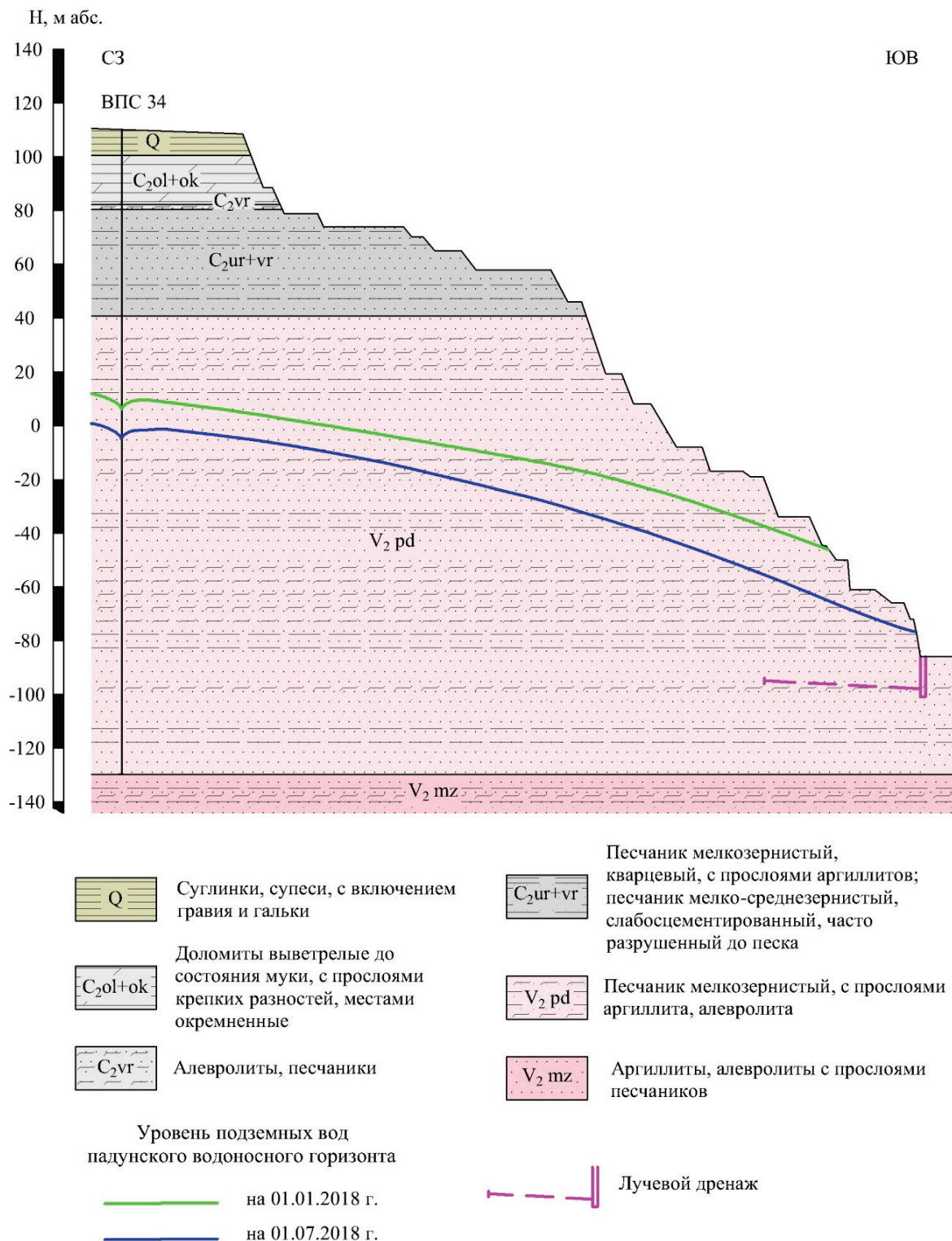


Рис. 2. Гидрогеологический разрез через лучевой дренаж

Fig. 2. Hydrogeological section through radial drainage

Заключение

С целью перехвата части проскока подземных вод в карьер осушение переходной зоны падунских и мезенских отложений предложено осуществлять внутрикарьерными горизонтальными устройствами.

Выполнено прогнозное численное моделирование доказательства принципиальной возможности и эффективности применения системы лучевого дренажа и горизонтальных дренажных скважин в стенку откоса борта карьера для интенсификации

процесса осушения падунских отложений в при-
бортовом массиве карьера.

Предложена методика реализации на числен-
ной модели внутрикарьерных дрен ГУ III рода с
поддержанием уровня подземных вод на отметке,
отвечающей глубине заложения лучевого дренажа
и горизонтальных дренажных скважин в откос
борта карьера, через дополнительное фильтра-
ционное сопротивление, учитывающее несовер-
шенство стока на плановой модели и несоответ-
ствие размеров блока модели и радиуса скважины.

Прогнозный водоприток к лучевому дренажу
изменяется от 259 до 216 м³/ч, к горизонтальным
дренажным скважинам – от 129 до 91 м³/ч, к
карьерному водоотливу – от 963 до 987 м³/ч. Об-
щий водоприток к системе дренажа карьера
($Q_{\text{впс}}=6850$ м³/ч) не превысит 7840 м³/ч.

Выполнен расчет прогнозной высоты высачива-
ния на бортах карьера с учетом развития карьера в
плане и разрезе. При отработке карьера до отметки
–125 м абс. высота высачивания превысит крити-
ческое значение на 3 м при условии, когда коэф-
фициент фильтрации падунских отложений в
верхней части равен $k=1,6$ м/сут, в нижней части
(мощность около 20 м) – $k=0,8$ м/сут.

Для недопущения опасного наращивания вы-
соты высачивания подземных вод в карьере тех-
нические мероприятия по сооружению внутри-
карьерных дренажных устройств должны быть
реализованы во второй половине 2018 г., по-
скольку подошва залегания падунских отложе-
ний может оказаться ниже расчетной отметки
–125 м абс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломакин Е.А., Мироненко В.А., Шестаков В.М. Численное мо-
делирование геофильтрации. – М.: Недра, 1988. – 228 с.
2. Гавич И.К. Теория и практика применения моделирования в
гидрогеологии. – М.: Недра, 1980. – 358 с.
3. Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование геофильтрации. –
М.: Недра, 1976. – 407 с.
4. Жернов И.Е., Шестаков В.М. Моделирование фильтрации под-
земных вод. – М.: Недра, 1971. – 226 с.
5. Jadwiga R.Z., Jeffrey M.P. Competition for water resources. Ex-
periences and Management Approaches in the US and Europe. –
St. Paul, Minnesota: Elsevier, 2016. – 460 p.
6. Anderson M.P., Woessner W.W. Applied Groundwater Mode-
ling. – San Diego: Academic Press, 2015. – 564 p.
7. Zekai Sen. Practical and Applied Hydrogeology. – Oxford: Elsevi-
er, 2015. – 406 p.
8. Smith L. Hydrogeology. Encyclopedia of Physical Science and
Technology (3rd ed.). – Vancouver, BC, Canada: University of Bri-
tish Columbia, 2015. – 406 p.
9. Xing Zhang, Sanderson D.J. Numerical Modelling and Analysis
of Fluid Flow and Deformation of Fractured Rock Masses. – Lon-
don, UK: Imperial College London, 2002. – 288 p.
10. Beale G. Hydrogeological model // Guidelines for Open Pit Design /
Eds. J. Read, P. Stacey. – Melbourne: CSIRO Publishing, 2010. –
P. 141–199.
11. Guidelines for groundwater modelling in open pit mine design /
J. Hazzard, B. Damjanac, L. Lorig, C. Detournay // Slope Stabi-
lity 2011 / Eds. E. Eberhardt, D. Stead. – Vancouver, Canada:
Canadian Rock Mechanics Association, 2011. – P. 114–126.
12. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. Theory of Fluid Flows
through Natural Rocks (Theory and Applications of Transport in
Porous Media). 1st ed. – Germany: Springer, 2011. – 412 p.
13. Sahimi M. Flow and Transport in Porous Media and Fractured
Rock. 2nd ed. – Weinheim: Wiley, 2011. – 709 p.
14. Su Y., Davidson J.H. Modeling Approaches to Natural Convec-
tion in Porous Media. – Cham; Heidelberg; New York; Dordrecht;
London: Springer, 2015. – 47 p.
15. Depner J.S., Rasmussen T.C. Hydrodynamics of Time-Periodic
Groundwater Flow – Diffusion Waves in Porous Media. – New
York: Wiley AGU, 2017. – 324 p.
16. Szymkiewicz A. Modelling Water Flow in Unsaturated Porous
Media: Accounting for Nonlinear Permeability and Material He-
terogeneity. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. –
237 p.
17. Simulation of Flow in Porous Media Applications in Energy and
Environment / P. Bastian, J. Kraus, R. Scheichl, M. Wheeler. –
Germany: Walter de Gruyter, 2013. – 222 p.
18. Норватов Ю.А. Изучение и прогноз техногенного режима под-
земных вод (при освоении месторождений полезных ископае-
мых). – М.: Недра, 1988. – 261 с.
19. Шестаков В.М. Динамика подземных вод. – М.: Изд-во МГУ,
1979. – 368 с.
20. Фисун Н.В., Ленченко Н.Н. Динамика подземных вод. – М.:
Научный мир, 2016. – 268 с.
21. Архангельская алмазоносная провинция (геология, петрогра-
фия, геохимия и минералогия) / О.А. Богатилов, В.К. Гара-
нин, В.А. Кононова и др. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 524 с.
22. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные место-
рождения алмазов мира. – М.: Недра, 1998. – 555 с.
23. Топчий Г.Е. Методическое пособие по применению сеточных
электроинтеграторов для решения задач неустановившейся
фильтрации подземных вод. – Белгород: Изд-во ВЮГЕМ,
1971. – 56 с.

Поступила 05.09.2018 г.

Информация об авторах

Еланцева Л.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий научным отделом ООО НТЦ «НОВОТЭК».

Зайцев Д.А., кандидат технических наук, главный инженер проектов ООО НТЦ «НОВОТЭК».

Фоменко С.В., научный сотрудник ООО НТЦ «НОВОТЭК».

UDC 556.3.06

HYDROGEOLOGICAL FORECASTS FOR DEWATERING DIAMOND DEPOSIT NAMED AFTER V. GRIB

Lyudmila A. Elantseva¹,
LAElanceva@novotek15.ru

Denis A. Zaitsev¹,
Zden86@yandex.ru

Sergey V. Fomenko¹,
SVFomenko@rambler.ru

¹ NEWTECH Co., Ltd (OOO NTC NOVOTEK),
131, B. Khmel'nitskogo avenue, Belgorod, 308002, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to involve in industrial using a diamond deposit, very complicated from hydro-geological point of view, in which ore production is carried out with important dewatering activities aimed to create a safe mining conditions. Forecasting the managed dewatering and changes in hydro-geological conditions during deposit exploitation is a complex problem, which requires a consideration of many natural and mining factors and development of methodical approach for its solution.

The main aim of the research is to develop the methodology and implement the hydro-geological forecasts for effective draining during exploitation of diamond deposit named after V. Grib.

Objects: drained aquifers and drainage system of open pit.

Methods: analysis of using the numerical modeling methods for studying groundwater filtration during dewatering of mineral deposits, numerical modeling.

Results. Based on the study of geological and hydrogeological conditions of the diamond deposit named after V. Grib, method of development, drained aquifers, sources of formation of water inflows to the drainage system of the open pit, the numerical model of groundwater filtration have created. In order to drainage of the Padun aquiferous complex at sites where dewatering is not ensured by pumping wells it is recommended to intercept a part of groundwater penetrating into the open pit by means of a drainage devices inside the open pit for dewatering transitional zone between Padun and Mezen sedimentations. The authors proposed the technique for implementing drains inside the open pit in numerical model and carried out the prognosing calculations for effective drainage of the deposit. Using the numerical modeling method the authors proved the efficiency of applying radial drains and horizontal drainage wells to intensify dewatering of the Padun sedimentations in rock massif near the open pit border. The forecast calculations were performed for estimation of seepage height inside the open pit taking into account the mining plan. The timing of drainage devices construction inside the open pit was substantiated.

Key words:

Managed dewatering, pumping wells, open pit drainage, hydrogeological forecasts, numerical modeling, radial drainage, horizontal drainage wells.

REFERENCES

1. Lomakin E.A. Mironenko V.A. Shestakov V.M. *Chislennoe modelirovanie geofiltratsii* [Numerical modeling of geofiltration]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 228 p.
2. Gavich I.K. *Teoriya i praktika primeneniya modelirovaniya v gidrogeologii* [Theory and practice of modeling application in hydrogeology]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 358 p.
3. Lukner L., Shestakov V.M. *Modelirovanie geofiltratsii* [Modeling of geofiltration]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 407 p.
4. Zhernov I.E., Shestakov V.M. *Modelirovanie filtratsii podzemnykh vod* [Modelling of groundwater filtration]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 226 p.
5. Jadwiga R.Z., Jeffrey M.P. *Competition for water resources. Experiences and Management Approaches in the US and Europe*. St. Paul, Minnesota, Elsevier, 2016. 460 p.
6. Anderson M.P., Woessner W.W. *Applied Groundwater Modeling*. San Diego, Academic Press, 2015. 564 p.
7. Zekai Sen. *Practical and Applied Hydrogeology*. Oxford, Elsevier, 2015. 406 p.
8. Smith L. *Hydrogeology. Encyclopedia of Physical Science and Technology*. 3rd ed. Vancouver, BC, Canada, University of British Columbia, 2015. 406 p.
9. Xing Zhang, Sanderson D.J. *Numerical Modelling and Analysis of Fluid Flow and Deformation of Fractured Rock Masses*. London, UK, Imperial College London, 2002. 288 p.
10. Beale G. Hydrogeological model. *Guidelines for Open Pit Design*. Eds. J. Read, P. Stacey. Melbourne, CSIRO Publishing, 2010. pp. 141–199.
11. Hazzard J., Damjanac B., Lorig L., Detournay C. Guidelines for groundwater modelling in open pit mine design. *Slope Stability 2011*. Eds. E. Eberhardt, D. Stead. Vancouver, Canada, Canadian Rock Mechanics Association, 2011. pp. 114–126.
12. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. *Theory of Fluid Flows through Natural Rocks* (Theory and Applications of Transport in Porous Media). 1st ed. Germany, Springer, 2011. 412 p.
13. Sahimi M. *Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock*. 2nd ed. Weinheim, Wiley, 2011. 709 p.
14. Su Y., Davidson J.H. Modeling Approaches to Natural Convection in Porous Media. Cham; Heidelberg; New York; Dordrecht; London, Springer, 2015. 47 p.
15. Depner J.S., Rasmussen T.C. *Hydrodynamics of Time-Periodic Groundwater Flow – Diffusion Waves in Porous Media*. New York, Wiley AGU, 2017. 324 p.
16. Szymkiewicz A. *Modelling Water Flow in Unsaturated Porous Media: Accounting for Nonlinear Permeability and Material Heterogeneity*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2014. 237 p.
17. Bastian P., Kraus J., Scheichl R., Wheeler M. *Simulation of Flow in Porous Media Applications in Energy and Environment*. Germany, Walter de Gruyter, 2013. 222 p.
18. Norvatov Yu.A. *Izucheniye i prognoz tekhnogen'nogo rezhima podzemnykh vod pri osvoenii mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh*

- [The study and forecast of the technogenic regime of groundwater (with the development of mineral deposits)]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 261 p.
19. Shestakov V.M. *Dinamika podzemnykh vod* [The dynamics of groundwater]. Moscow, MSU Publ., 1979. 368 p.
20. Fisun N.V., Lenchenko N.N. *Dinamika podzemnykh vod* [The dynamics of groundwater]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2016. 268 p.
21. Bogatkov O.A., Garanin V.K., Kononova V.A. *Arkhangelskaya almazonosnaya provintsia, geologiya, petrografiya, geokhimiya i mineralogiya* [Arkhangelsk diamondiferous province (geology, petrography, geochemistry and mineralogy)]. Moscow, MSU Publ., 1999. 524 p.
22. Kharkiv A.D., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I. *Korennye mestorozhdeniya almazov mira* [Primary deposit of diamonds of the world]. Moscow, Nedra Publ., 1998. 555 p.
23. Topchii G.E. *Metodicheskoe posobie po primeneniyu setochnykh elektrointegratorov dlya resheniya zadach neustanovivsheisya filtratsii podzemnykh vod* [Methodical manual on the application of grid electrointegrators for solving the problems of unsteady groundwater filtration]. Belgorod, VIOGEM Publ., 1971. 56 p.

Received: 5 September 2018.

Information about the authors

Lyudmila A. Elantseva, Cand. Sc., head of scientific department NEWTECH Co., Ltd (OOO NTC NOVOTEK).

Denis A. Zaitsev, Cand. Sc., chief project engineer NEWTECH Co., Ltd (OOO NTC NOVOTEK).

Sergey V. Fomenko, research officer chief project engineer NEWTECH Co., Ltd (OOO NTC NOVOTEK).

УДК 662.71.74

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА КОТЛОАГРЕГАТОВ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ИСТОЧНИКА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Збараз Леонид Иосифович¹,
Zbaraz_Len@ukr.net

Чичерин Станислав Викторович²,
man_csv@hotmail.com

¹ Национальный технический университет «Харьковский Политехнический институт»,
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Кирпичёва, 2.

² Омский государственный университет путей сообщения,
Россия, 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Актуальность. Реконструкция источника теплоснабжения может привести к появлению чрезмерного резерва мощности, что сделает его эксплуатацию дорогостоящей из-за больших потерь в периоды низкой тепловой нагрузки и значительных капиталовложений. С другой стороны, энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов не всегда возможно в периоды максимального потребления тепловой энергии. Чтобы обеспечить такой спрос, как правило, создаются пиковые элементы генерации. Поскольку такие источники обычно маломощны и предназначены для краткосрочной работы, в качестве топлива часто предусматривается дорогостоящее топливо, что делает задачу оптимального конфигурирования оборудования при реконструкции источника теплоснабжения актуальной.

Цель и задачи исследования. Формализовано цель можно выразить следующим образом: среди всех возможных вариантов установки оборудования выбрать такой, при котором прямые затраты энергоносителей за отопительный сезон будут минимальными, но при этом заданная тепловая нагрузка будет обеспечиваться.

Методы. Оптимальная схема выбиралась после расчета нескольких конфигураций оборудования котельной и сравнения прямых затрат за отопительный сезон для разных климатических зон. Ограничения, наложенные на единичную величину вырабатываемой мощности и КПД, и принятая методика расчета привели к минимально возможному количеству независимых переменных. Общая тепловая нагрузка распределялась между несколькими котлами, что, исходя из практики эксплуатации, является предпочтительным вариантом, когда агрегаты связаны между собой по параллельной схеме. Принята схема, когда дополнительный котел, находящийся в резерве, включается, если заданная нагрузка не может быть покрыта котлами, уже находящимися в работе, о чем сигнализируют показания расходомера пара или датчик температуры теплоносителя в подающем трубопроводе. Поскольку зависимость КПД котла от удельной нагрузки на стадии проектирования и реконструкции неизвестна, для расчетов принимаем среднестатистическую зависимость КПД брутто котла от удельной нагрузки. Решать задачу предлагается с помощью средств автоматизации расчетов, например, прикладного пакета программ Statistika 6.

Результаты. Были выполнены расчёты для котельных, расположенных в Республике Татарстан, Харьковской и Омской областях. Принятая тарифная составляющая достигала 3,68 руб./кВт·ч электрической энергии и 5,48 руб. за кубометр природного газа. Для подключённой тепловой нагрузки 4,2 МВт, рассматривая одну из шести комбинаций компоновки: от двух котлов одинаковой мощности по 2,5 МВт каждый до набора котельного оборудования 2,5 МВт, 1,6 МВт и 1,0 МВт, было установлено, что ситуация для различных объектов принципиально отличается. Для Харьковской и Омской областей, отличающихся наиболее теплым и холодным климатом, соответственно, оптимальным является вариант установки котлов мощностью 2,5, 1,6 и 1,0 МВт, а для г. Казани – два котла по 2,0 и один – 1,0 МВт.

Выводы. Использованный в настоящей работе метод решения двухуровневой оптимизационной задачи, для решения которой применялся принцип декомпозиции, позволил установить оптимальную из шести возможных комбинаций компоновку котельной. Разработанный подход может стать полезным инструментом в руках проектировщика. Полученные результаты интересны и определенно должны подтвердиться на практике. В частности, показана возможность производства при минимальных затратах первичных энергоносителей, что в свою очередь приведет к снижению вредного воздействия на окружающую среду и позволит говорить об энергоэффективной технологии производства и преобразования энергии на основе георесурсов.

Ключевые слова:

Энергоносители, теплоснабжение, природный газ, котельная, производство, генерация, оптимизация, минимизация, затраты.

Введение

В настоящий момент большое количество средств вкладывается в модернизацию источников теплоснабжения. Целью реконструкции является не только повышение надёжности, но и снижение прямых затрат на выработку тепловой энергии и отпуск её потребителям. Экономичность работы источника, в свою очередь, может быть достигнута при эксплуатации оборудования в диапазоне максимального КПД.

Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов является темой работы многих ученых на протяжении длительного периода времени. В то же время большая часть работ связана с использованием нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (НВИЭ), например [1–3]. Широкое применение последних возможно, главным образом, в странах Западной Европы. В России и Украине, где не имеется полноценной нормативной базы, описывающей

строительство и подключение таких источников к сетям общего пользования, а вопросы сбыта произведенной энергии не отрегулированы, перечисленные работы не являются актуальными в краткосрочной перспективе.

Между тем энергоэффективное производство на основе георесурсов хорошо согласуется с тезисами, выдвинутыми в [4], в числе которых реконструкция промышленно-отопительных котельных и более широкое внимание к НВИЭ. Традиционные котельные установки, использующие в качестве топлива природный газ, описаны в [5], однако большую часть объема материала занимает эксергетический анализ уже имеющегося оборудования без учета возможной модернизации или реконструкции.

С точки зрения решения задачи оптимизации (минимизации составляющих) наиболее близки и полезны статьи [6, 7], но если в первой работе акцент сделан не столько на затратной части, сколько на удовлетворении спроса на тепловую энергию, вырабатываемую несколькими источниками теплоснабжения, работающими на общую тепловую сеть, то во второй много внимания уделяется эксплуатации оборудования, причем в качестве источника рассматривается только ТЭЦ. Комбинированная выработка в условиях современной рыночной экономики и политико-экономической формации исследована в [8]. Если абстрагироваться от теплофикации, обращает на себя внимание статья [9], где изучена реконструкция объекта районной генерации (квартальной тепловой станции, РТС), количество последних, например, в г. Москва достигает 68.

Модернизация источника теплоснабжения – тема исследования [10], однако рассматривается сложный и дорогостоящий процесс замены твердотопливных котлов на газотурбинные установки малой мощности, требующий многомиллионных инвестиций. Котлы, где также в качестве первичного энергоносителя применяются угли, подробно исследованы в [11]. Моделирование пылеугольного котла Кировской ТЭЦ-4 [12] позволило выявить ряд мер, при реализации которых возможно повышение режимных характеристик и достижение экономии топлива, т. е. решаются задачи, поставленные и в настоящей работе.

Что касается конфигурировании генерирующего оборудования, то с некоторой оговоркой результаты настоящего исследования сравнивались с упомянутыми тремя работами [1–3], несмотря на то, что там изучались котельные, сжигающие ТБО, гелиоколлекторы и котлы утилизаторы, использующие бросовое тепло промышленных объектов. Вопросы компоновки котельных агрегатов особенно актуальны в свете появления технологии, предполагающей создание дополнительного тракта в котельной установке, внутри которого будет циркулировать диатермическое минеральное масло [13]. Конфигурирование генерирующего оборудования при модернизации источника опи-

сывается также в [14], однако опять применительно к источнику комбинированной выработки, причем использующему в качестве топлива именно уголь, что не позволяет говорить о приемлемости сравнения полученных в [14] результатов с результатами настоящего исследования.

Контекст и специфика отечественной инфраструктуры преобразования энергии характеризуются высокой степенью аварийности систем транспортировки тепла – тепловой сети [15]. Аналогичная ситуация характерна для других стран СНГ и для всего постсоветского пространства в целом [16]. По причине значительного износа систем теплоснабжения и теплопотребляющих установок продолжают выдвигаться предложения [17] о переходе на автономное (децентрализованное) теплоснабжение, что не позволит реализовывать преимущества распределения тепловой нагрузки между тепловыми источниками и их агрегатами, а также усугубит и так негативную экологическую ситуацию [18].

Целью настоящей работы является установление оптимального с точки зрения затрат на электрическую энергию и топливо количества котельных агрегатов и их мощности применительно к трем географическим локациям. Результаты формализации и алгоритм решения должны быть пригодны для аналогичной задачи в рамках любого населенного пункта в широком диапазоне исходных данных температуры наружного воздуха, тепловой нагрузки, состава оборудования и тепловых схем источника теплоснабжения.

Материалы и методы исследования

К основным исходным данным, влияющим на выбор энергетического оборудования отопительной котельной при модернизации, относятся:

- 1) подключенная тепловая нагрузка и её составляющие (технология, отопление, горячее водоснабжение, вентиляция);
- 2) схемы подключения потребителей (зависимая, независимая, элеваторная, с насосным смешением, с регулированием теплопотребления и т. д.);
- 3) наличие ЦТП в схеме теплоснабжения;
- 4) расчётная температура наружного воздуха, продолжительность отопительного сезона, распределение температур наружного воздуха в течение отопительного сезона;
- 5) температурные графики системы теплоснабжения;
- 6) величина тепловых и гидравлических потерь в подключенной тепловой сети;
- 7) стоимость энергоносителей.

В зависимости от этого при реконструкции и выбирают оптимальную компоновку и тепловую схему котельной, количество и мощность котлов, параметры и число насосов и т. д. В конечном итоге основным показателем эффективности принятого решения является срок окупаемости вложенных средств. В любом случае при проведении реконструкции необходимо решать оптимизацион-

ную задачу: выбор оптимальной тепловой схемы, типа котлов и их количество, циркуляционных, котловых насосов и другого вспомогательного оборудования.

Для решения оптимизационной задачи введём следующие обозначения.

Удельной нагрузкой на i -й котёл q_i будем называть величину (1), равную отношению вырабатываемой тепловой энергии i -м котлом – Q_i к номинальной мощности i -го котла – Q_i^n .

$$q_i = \frac{Q_i}{Q_i^n}. \quad (1)$$

Если для уже введённых в эксплуатацию котлов зависимость КПД от удельной нагрузки определена в ходе пуско-наладочных испытаний, то для проектируемых или строящихся котлов эту зависимость можно принять усреднённой, как для котлов определённой модификации.

Формализация рассматриваемой оптимизационной задачи звучит следующим образом: *среди всех возможных вариантов установки оборудования выбрать такой, при котором прямые затраты энергоносителей за отопительный сезон будут минимальными*. Это двухуровневая оптимизационная задача, для решения которой необходимо применить принцип декомпозиции. Задачу будем решать в общем виде для произвольного количества котлов. На первом уровне решим задачу оптимального распределения нагрузки между котлами разной установленной тепловой мощности при условии, что зависимость КПД котлов от вырабатываемой мощности $\eta = \eta(q_i)$ одинакова.

На величину q_i наложим ограничения (2):

$$0,3 \leq q_i \leq 1,1. \quad (2)$$

Суммарная выработка тепловой энергии n котлами (3):

$$Q_\Sigma = \sum_{i=1}^n Q_i \text{ МВт}. \quad (3)$$

Расход газа i -м котлом:

$$G_i = \frac{q_i Q_i^n}{Q_{\text{н}}^p \eta(q_i)} \text{ м}^3 / \text{ч}. \quad (4)$$

В уравнении (4) $Q_{\text{н}}^p = 33,5 \text{ МДж/м}^3$ – низшая теплотворная способность природного газа.

Для принятых обозначений суммарный расход газа (5):

$$G_\Sigma = \sum_{i=1}^n \frac{q_i Q_i^n}{Q_{\text{н}}^p \eta(q_i)} \text{ м}^3 / \text{ч}. \quad (5)$$

По условию задачи $G_\Sigma \rightarrow \min$. Нам надо определить, при каких значениях вектора q_i выполняется это условие.

Применим обычный аппарат дифференциального исчисления функции нескольких переменных:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial G_\Sigma}{\partial q_i} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i^n \eta(q_i) - Q_i^n q_i \eta'(q_i)}{Q_{\text{н}}^p \eta^2(q_i)} = 0. \quad (6)$$

В уравнении (6) $\eta'(q_i)$ – производная от функции $\eta(q_i)$ при изменении удельной нагрузки q_i на котёл.

Для выполнения равенства достаточно, чтобы каждое слагаемое равнялось нулю.

$$\eta(q_i) - q_i \eta'(q_i) = 0.$$

Тогда оптимальная удельная нагрузка на i -й котёл (7):

$$q_i^{\text{опт}} = \frac{\eta(q_i)}{\eta'(q_i)}, \quad (7)$$

при очевидном условии: $\eta'(q_i) \neq 0$.

Поскольку корреляционная зависимость $\eta(q_i)$ задана аналитически как непрерывная функция от q_i , $\eta'(q_i)$ может быть также выражена аналитически.

Таким образом, при одинаковой зависимости $\eta(q_i)$ всех котлов, как мы приняли, для новой котельной до проведения пусконаладочных работ удельная нагрузка q_i на все котлы при моделировании также принимается одинаковой.

В опубликованных ранее работах, например [19], показано, что наиболее рациональной, с точки зрения расхода электроэнергии, является тепловая схема, приведенная на рис. 1, поскольку для принятой тепловой схемы (качественное регулирование) отсутствуют гидравлические потери на регуляторах.

Затраты электроэнергии на перекачку теплоносителя сетевым насосом постоянны и не зависят от температуры наружного воздуха. Для расчётов принимаем температурный график 95–70 °С. Выбор такого графика частично связан с применимостью полимерных трубопроводов, не подверженных коррозионному износу, при строительстве и реконструкции тепловых сетей [20].

Максимальный перепад температуры на котле 25 °С. Расход теплоносителя через котёл для снятия 1,0 МВт тепловой нагрузки определим по уравнению (8):

$$G_{\text{к}} = \frac{1,0 \cdot 0,97}{4,187 \cdot 25} \cdot 3600 = 33,4 \text{ м}^3 / \text{ч}. \quad (8)$$

КПД насосной установки $\eta_{\text{ны}}$ принимаем 76 %. Тогда затраты электроэнергии на перекачку теплоносителя определяем по формуле (9):

$$P = \frac{g \rho G_{\text{к}} \Delta H}{1000 \eta_{\text{ны}}} \text{ кВт}, \quad (9)$$

где $g = 9,81 \text{ м}^2 / \text{с}^2$ – ускорение свободного падения; $\rho = 970 \text{ кг/м}^3$ – плотность перекачиваемой жидкости; $\Delta H = 2 \text{ м}$ – гидравлическое сопротивление котла; $G_{\text{к}}$ – расход воды через котёл, $\text{м}^3 / \text{с}$.

Для примера смоделируем реконструкцию котельной с подключённой тепловой нагрузкой 4,2 МВт в Республике Татарстан, Харьковской и Омской областях. Тепловые потери приняты одинаковыми и составляющими 13 % от объема отпущенной тепловой энергии с коллекторов источника.

Гидравлическая схема котельной (рис. 1) подобрана следующим образом. Сетевые насосы Н1,

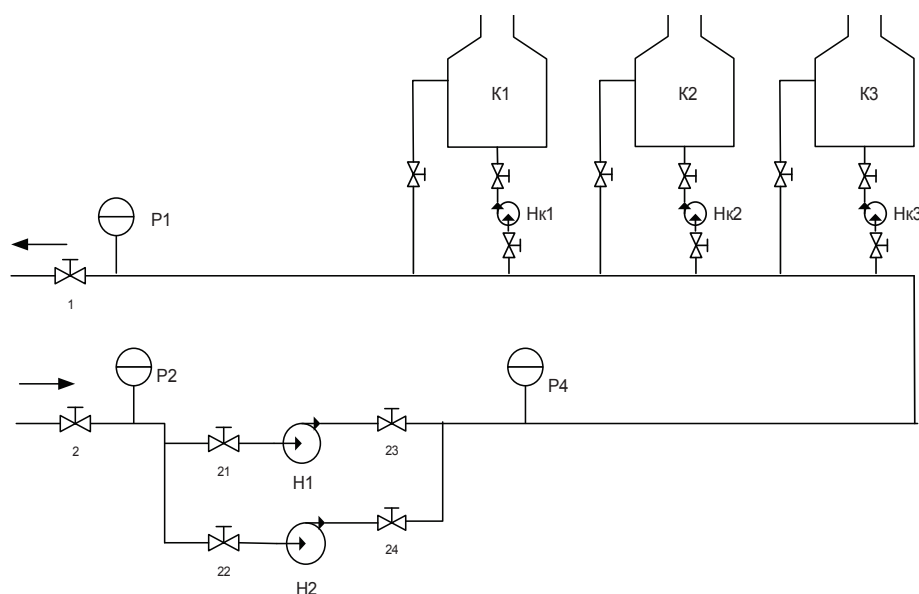


Рис. 1. Гидравлическая схема водогрейной котельной: Н1, Н2 – сетевые насосы (рабочий и резервный), К1, К2, К3 – отопительные котлы, Нк1, Нк2, Нк3 – котловые насосы 1-го, 2-го, 3-го котла соответственно, Р1, Р2, Р3 – манометры. Цифрами обозначена запорная арматура, стрелками – направление движения теплоносителя

Fig. 1. Scheme of central plant supplied with hot-water generators with the main district heating network pump H1, and the backup one H2; boilers K1, K2, and K3; feedwater pumps Нк1, Нк2, and Нк3; pressure sensors P1, P2, and P3. Numerals denote shut-off valves, and arrows denote direction of flow

Н2 работают только на компенсацию гидравлических потерь в тепловых сетях и создание необходимого напора перед потребителем. Гидравлическое сопротивление котла компенсирует котловой насос, который включается только при включении котла.

Как видно из рис. 1, для покрытия данной тепловой нагрузки могут быть использованы котлы мощностью 1,0, 1,25; 1,6; 2; 2,5 и 3,15 МВт, установленные по параллельной схеме в одной из шести нижеперечисленных комбинаций: (2,5 МВт; 2,5 МВт); (1,6 МВт; 3,15 МВт); (2,0 МВт; 3,15 МВт); (1,6 МВт; 1,6 МВт, 1,6 МВт); (2,0 МВт; 2,0 МВт, 1,0 МВт), (2,5 МВт; 1,6 МВт, 1,0 МВт). Базовый вариант – компоновка котельной двумя котлами одинаковой мощности по 2,5 МВт каждый. Для сравнения выполним расчёты для котельных, расположенных в Республике Татарстан,

Харьковской и Омской областях. Исходные данные приведены в табл. 1.

Поскольку зависимость КПД котла от удельной нагрузки на стадии проектирования и реконструкции неизвестна, для расчётов принимаем среднестатистическую зависимость КПД брутто котла от удельной нагрузки, которая приведена на рис. 2. Данная зависимость была получена автором в результате большого числа пусконаладочных работ на жаротрубных котлах разных производителей.

Результаты исследования и их обсуждение

С помощью прикладного пакета программ Statistika 6 аппроксимируем кривую, приведенную в разделе выше, полиномом пятой степени:

$$y=0,2564x^5-1,2354x^4+2,007x^3-1,7134x^2+0,9479x+0,6251. \quad (10)$$

Таблица 1. Климатическая характеристика объектов исследования

Table 1. Climatic data on the tested areas

Город City	Расчётная температура наружного воздуха (°C) Design outdoor temperature (°C)	Число суток/часов за отопительный период со среднесуточными температурами наружного воздуха в °C Duration of an average outdoor temperature through a day (days/hours, °C)										Продолжительность отопительного сезона (сутки/часы) Duration of a heating season (days/hours)
		-45...-40	-40...-35	-35...-30	-30...-25	-25...-20	-20...-15	-15...-10	-10...-5	-5...0	0...8	
Харьков Kharkov	-23	-	-	-	1,96	5,21	10	20	35	54	65	191
		-	-	-	47	125	246	487	829	1299	1551	4584
Казань Kazan	-29	-	0,03	0,82	3,6	9,2	19	31	40	55	59	217
		-	0,7	19,7	86,4	221	462	734	950	1318	1416	5208
Омск Omsk	-36	0,23	2,44	5,4	12,1	19,5	30	34,2	34	39	50	227
		5,5	58,6	130	290	468	710	821	823	939	1200	5448

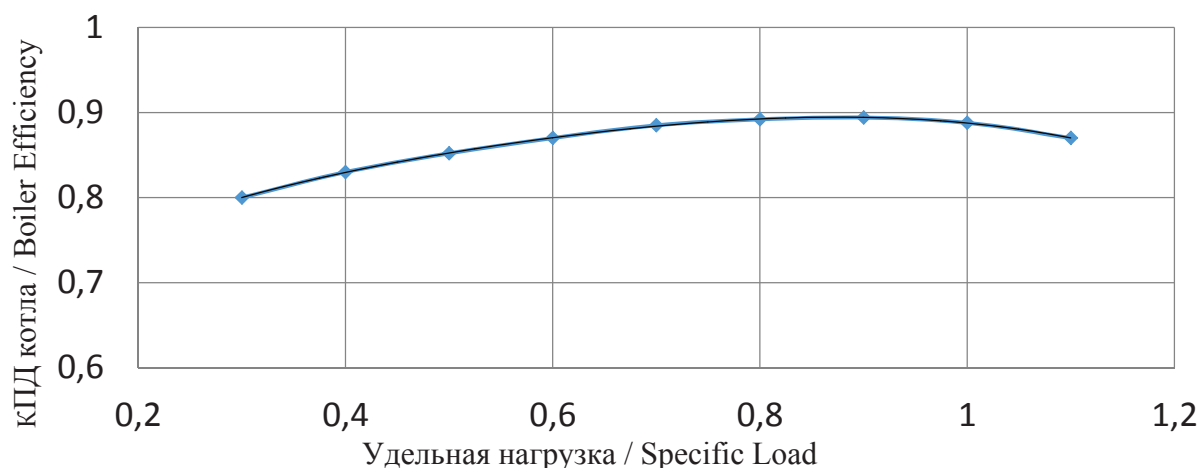


Рис. 2. Зависимость КПД котельной установки от удельной нагрузки

Fig. 2. Effect of specific load on boiler installation efficiency

Вычисление КПД по уравнению (10) при работе котла на газообразном топливе при номинальной нагрузке дает значение 92–94 %, что хорошо согласуется со значениями, приведенными в [12]. Результаты решения оптимизационной задачи выбора энергетического оборудования котельной для Харьковской области приведены в табл. 2.

Данные в этой и последующих таблицах, приведенные со знаком «минус», означают экономию. В [1] рассматривалось три варианта состава котлов котельной, работающей на ТБО. С точки зрения

финансовых затрат выигрышным оказался вариант, согласно которому теплом от такой котельной обеспечиваются не только пригороды, но и сам г. Турин (Италия), когда общее количество потребителей достигнет 900 тыс. человек. Учитывая экологическую составляющую затрат работы котельной (налог на выбросы), при реконструкции источника теплоснабжения следует также рассматривать варианты комбинированной выработки электрической, тепловой энергии и холодоснабжения. Интересно, что в упомянутой работе [1] тариф

Таблица 2. Прямые затраты энергоносителей за сезон (натуральные и денежные показатели)

Table 2. Demand for primary energy sources during a heating season in kind and in cash

Компоновка/Configuration	Ед. изм./Unit	2,5+2,5	1,6+3,15	2,0+3,15	1,6+1,6+1,6	2,0+2,0+1,0	2,5+1,6+1,0
Газ/Gas	1000 м ³ (m ³)	1230,92	1213,45	1219,909	1214,06	1215,28	1208,79
Отклонение Difference	1000 м ³ (m ³)	Базовый сценарий Base scenario	-17,47	-11,02	-16,86	-15,65	-22,14
Тариф: 10,37 грн/м ³ Billing price: 10,37 UAH/m ³	тыс. грн UAH 1,000	Базовый сценарий Base scenario	-181,18	-114,21	-174,82	-162,25	-229,54
Э/энергия/Electricity	кВт/kW	3896,38	3326,18	3568,52	2685,11	2892,87	3014,70
Отклонение Difference	кВт/kW	Базовый сценарий Base scenario	-570,20	-327,86	-1211,27	-1003,51	-881,67
Тариф: 2,4 грн/кВтч Billing price: 2,4 UAH/kWh	тыс. грн UAH 1,000	Базовый сценарий Base scenario	-1,37	-0,79	-2,91	-2,41	-2,12
Итог Total	тыс. грн UAH 1,000	Базовый сценарий Base scenario	-182,55	-115,00	-177,73	-164,66	-231,66

Таблица 3. Прямые затраты энергоносителей за сезон (натуральные и денежные показатели)

Table 3. Demand for primary energy sources during a heating season in kind and in cash

Компоновка/Configuration	Ед. изм./Unit	2,5+2,5	1,6+3,15	2,0+3,15	1,6+1,6+1,6	2,0+2,0+1,0	2,5+1,6+1,0
Газ/Gas	1000 м ³ (m ³)	1272,08	1252,06	1247,383	1252,67	1236,51	1241,95
Отклонение Difference	1000 м ³ (m ³)	Базовый сценарий Base scenario	-20,02	-24,70	-19,41	-35,57	-30,13
Тариф: 5,48 р./м ³ Billing price: 5,48 roubles per m ³	тыс. р. 1,000 roubles	Базовый сценарий Base scenario	-109,7	-135,3	-106,4	-194,9	-165,1
Э/энергия/Electricity	кВт/kW	3413,9	3634,8	3488,3	3578,8	3051,4	2957,4
Отклонение Difference	кВт/kW	Базовый сценарий Base scenario	220,9	74,4	164,9	-362,4	-456,5
Тариф: 3,56 р./кВтч Billing price: 3,56 roubles per kWh	тыс. р. 1,000 roubles	Базовый сценарий Base scenario	0,8	0,3	0,6	-1,3	-1,6
Итог Total	тыс. р. 1,000 roubles	Базовый сценарий Base scenario	-108,9	135,1	-105,8	-196,2	-166,7

Таблица 4. Прямые затраты энергоносителей за сезон (натуральные и денежные показатели)

Table 4. Demand for primary energy sources during a heating season in kind and in cash

Компоновка/Configuration	Ед. изм./Unit	2,5+2,5	1,6+3,15	2,0+3,15	1,6+1,6+1,6	2,0+2,0+1,0	2,5+1,6+1,0
Газ/Gas	1000 м ³ (m ³)	1257,57	1252,64	1252,108	1262,22	1239,81	1238,61
Отклонение Difference	1000 м ³ (m ³)	Базовый сценарий Base scenario	-4,93	-5,46	4,64	-17,77	-18,96
Тариф: 4,93 р./м ³ Billing price: 4,93 roubles per m ³	тыс. р. 1,000 roubles	Базовый сценарий Base scenario	-24,3	-26,9	22,9	-87,6	-93,5
Э/энергия/Electricity	кВт/kW	3947,0	3791,2	4096,2	4112,3	3746,5	3061,6
Отклонение Difference	кВт/kW	Базовый сценарий Base scenario	-155,8	149,2	165,3	-200,5	-885,4
Тариф: 3,68 р./кВтч Billing price: 3,68 roubles per kWh	тыс. р. 1,000 roubles	Базовый сценарий Base scenario	-0,6	0,5	0,6	-0,7	-3,3
Итого/Total	тыс. р. 1,000 roubles	Базовый сценарий Base scenario	-24,9	-26,4	23,5	-88,3	-96,7

на электрическую энергию установлен в размере 74,72 €/MWh, а на тепловую – 20 €/MWh, т. е. сопоставимый относительно рассмотренных населенных пунктов России и Украины. Результаты решения оптимизационной задачи выбора энергетического оборудования котельной для Республики Татарстан показаны в табл. 3.

Результаты решения оптимизационной задачи выбора энергетического оборудования котельной для Омской области приведены в табл. 4.

Для сравнения, в работе [9] получена гораздо более ощутимая экономия в размере 22,37 млн р. в год, однако предложенные там мероприятия по оборудованию водогрейной котельной собственным источником электрической генерации требуют масштабных инвестиционных затрат в размере 65 млн р. и не связаны с простым конфигурированием оборудования котельной, как в настоящей работе.

Заключение

Как показало решение оптимизационной задачи, в разных регионах компоновка котельной одной и той же мощности должна быть различная. Для Харьковской ($T_p = -23^\circ\text{C}$) и Омской ($T_p = -36^\circ\text{C}$) областей оптимальным является состав оборудования 2,5; 1,6; 1,0 МВт, а для г. Казани ($T_p = -29^\circ\text{C}$) – 2,0; 2,0; 1,0 МВт. Традиционный состав оборудования – 2,5+2,5 МВт является максимально убыточным с точки зрения прямых затрат для Харьковской области и Республики Татарстан. Для г. Омска же наиболее нерациональным будет котельная в составе трёх котлов одинаковой мощности 1,6 МВт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Panepinto D., Zanetti M.C. Municipal solid waste incineration plant: a multi-step approach to the evaluation of an energy-recovery configuration // Waste Management. – 2018. – V. 73. – P. 332–341. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.07.036
2. Innovative planning and evaluation system for district heating using waste heat considering spatial configuration: a case in Fukushima, Japan / Y. Dou, T. Togawa, L. Dong, M. Fujii, S. Ohnishi, H. Tanikawa, T. Fujita // Resources, Conservation and Recycling. – 2018. – V. 128. – P. 406–416. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.03.006
3. Photovoltaic thermal hybrid solar collector and district heating configurations for a Central European multi-family house /

Использованный в настоящей работе метод решения двухуровневой оптимизационной задачи, для решения которой применялся принцип декомпозиции, позволил установить оптимальную из шести возможных комбинаций компоновку оборудования. В частности, показана возможность производства при минимальных затратах первичных энергоносителей, что, в свою очередь, приведет к снижению вредного воздействия на окружающую среду и позволит говорить об энергоэффективной технологии производства и преобразования энергии на основе георесурсов. Результаты в форме денежных показателей указывают на то, что приведенный математический аппарат может быть полезен и пригоден для решения аналогичной задачи в рамках любого населенного пункта с учетом разности тарифов на газ и электрическую энергию. Дальнейшее развитие настоящего исследования предполагается выполнить путем рассмотрения влияния появления дополнительного циркуляционного контура с теплоносителем из минерального масла [13] на оптимальный состав оборудования котельной.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Правительства Российской Федерации (приказ Минобрнауки № 860 от 29.08.2017). Авторы также выражают признательность коллективу кафедры теплотехники и энергоэффективных технологий Национального технического университета «Харьковский Политехнический институт» (заведующий кафедрой д.т.н., проф. Ганжа А.Н.) за предоставленные данные и постоянную помощь в написании работы.

- N. Pardo García, G. Zubi, G. Pasaoglu, R. Dufo-López // Energy Conversion and Management. – 2017. – V. 148. – P. 915–924. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.05.065
4. Chicherin S.V. Comparison of a district heating system operation based on actual data – Omsk city, Russia, case study // International Journal of Sustainable Energy. – 2019. – V. 38. – № 6. – P. 603–614. DOI: 10.1080/14786451.2018.1548466
5. Terhan M., Comakli K. Energy and exergy analyses of natural gas-fired boilers in a district heating system // Applied Thermal Engineering. – 2017. – V. 121. – P. 380–387. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.091
6. Fang T., Lahdelma R. Genetic optimization of multi-plant heat production in district heating networks // Applied Energy. –

2015. – V. 159. – P. 610–619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.09.027
7. Franco A., Versace M. Optimum sizing and operational strategy of CHP plant for district heating based on the use of composite indicators // *Energy*. – 2017. – V. 124. – P. 258–271. DOI: 10.1016/j.energy.2017.02.062
8. Джангиров В.А., Лелюшкин Н.В., Маслов В.В. Кризис теплофикации? Выход есть! // *Энергетик*. – 2018. – № 1. – С. 3–8.
9. Энергосберегающая технология модернизации квартальных тепловых станций с устройством автономных низкотемпературных электрогенерирующих установок / П.П. Безруких, Ф.А. Поливода, А.А. Дзюба, В.П. Щербаков, Л.А. Шатров, Т.И. Набатчикова // *Энергобезопасность и энергосбережение*. – 2017. – № 6. – С. 19–28.
10. Tańczuk M., Skorek J., Bargiel P. Energy and economic optimization of the repowering of coal-fired municipal district heating source by a gas turbine // *Energy Conversion and Management*. – 2017. – V. 149. – P. 885–895. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.03.053
11. Хаустов С.А., Хаустова О.В., Ермолаев А.Н. Динамическая модель твердотопливного отопительного котла // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 16–26.
12. Тринченко А.А., Парамонов А.П. Техническое перевооружение котла БКЗ-210–140–13,8 на основе низкотемпературной вихревой технологии сжигания // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. – 2017. – Т. 23. – № 2. – С. 62–74. DOI: 10.18721/JEST.230206
13. Из опыта реконструкции производственной теплогенерирующей установки с использованием котлов на отработанном масле / Т.И. Королева, Н.В. Аржаева, О.В. Тараканов, Н.Ю. Иващенко // *Региональная архитектура и строительство*. – 2017. – № 1 (30). – С. 151–158.
14. Балтян В.Н., Ефимов Н.Н., Цхяев А.Д. К вопросу модернизации котельного оборудования угольных ТЭС // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. – 2017. – № 1 (193). – С. 50–53.
15. Збараз Л.И., Чичерин С.В. Методика оценки ущерба от аварийной ситуации в системе теплоснабжения // *Науковий вісник будівництва*. – 2017. – № 4 (90). – С. 218–224.
16. Абдыкалыков Э.Э., Батаканов М.Т. Теплофикация г. Бишкек // *Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова*. – 2017. – Т. 44. – № 4. – С. 14–20.
17. Новосельцев Б.П. Некоторые аспекты улучшения качества теплоснабжения зданий // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. – 2017. – № 3 (2). – С. 22–26.
18. К вопросу об эффективности и экологической безопасности теплоэнергетических систем / А.Н. Егоров, Е.В. Криволапова, Н.В. Бутримова, А.А. Егоров // *Вестник Оренбургского государственного университета*. – 2017. – № 12 (212). – С. 94–97.
19. Збараз Л.И. Моделирование децентрализованного источника теплоснабжения и выбор оптимальных параметров его работы // *Коммунальное хозяйство городов*. – 2015. – № 123. – С. 91–97.
20. Chicherin S., Volkova A., Latšov E. GIS-based optimisation for district heating network planning // *Energy Procedia*. – 2018. – V. 149. – P. 635–641. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.107

Поступила 11.09.2018 г.

Информация об авторах

Збараз Л.И., кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и энергоэффективных технологий Национального технического университета «Харьковский Политехнический институт».

Чичерин С.В., аспирант кафедры теплоэнергетики Омского государственного университета путей сообщения.

UDC 662.71.74

CONFIGURING A DISTRICT HEATING PLANT UNDER RECONSTRUCTION: OPTIMUM QUANTITY OF BOILER UNITS

Leonid I. Zbaraz¹,
Zbaraz_Len@ukr.net

Stanislav V. Chicherin²,
man_csv@hotmail.com

¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova str., 61002, Kharkiv, Ukraine.

² Omsk State Transport University,
35, Marx avenue, Omsk, 644046, Russia.

Relevance. An over-dimensioning district heating plant is costly, as there will be more losses during low-load periods and more capital bound in the investments. During the highload (peak load) periods, a regular heat plant might not be able to deliver enough heat to the system. To ensure that the customers still receive their heat, the peak production plants are often created to top-up during peak-load periods. As these peak-load plants are often small in size and constructed only to run for short periods of time, they are often fossil-fuel fired, or fired by other highly refined, and hence expensive fuels.

The aim of this work is to develop a tool (a multi-step approach) capable of adjusting the secondary load to match the optimum load structure to save primary energy sources, and meanwhile ensure the demand and supply balance.

Methods. The optimum scheme is selected by evaluating and comparing several schemes, considering the constraints from the original system configuration, which results in a limited number of independent variables. We dealt with sequencing control for multiple boilers as required by load demand that is desirable when two or more boilers are installed in parallel. This can be accomplished by utilizing a steam flowmeter or water temperature sensor, when applicable, to energize an additional boiler when the load cannot be met by the boilers already on-line. The difference in the efficiency between boilers located in different places can be appreciable if the fuel input to a boiler is modulated. This increase in efficiency is due to the increase in the ratio of heat exchanger surface area to heat input as the firing rate is reduced. The mathematical model should be solved with a programming software, such as Statistica 6.

Results. Three different geographical locations were considered. The authors have calculated the mean annual values for electricity accounted 3,68 roubles per kWh, and values for the days of highest plant activity accounted 5,48 roubles per cubic meter of gas, for comparison with an acceptable concentration level for the exposed population. The results indicate that for thermal energy value varying under six scenarios (from 2,5+2,5 to 2,5+1,6+1,0 MW configuration) the situation is completely different when implementing the optimization model for Kazan and Kharkiv. It can be also seen that 2,5+1,6+1,0 MW configuration (and in particular Kharkiv and Omsk: related to the warmest and coldest locations respectively) is more advantageous from the economic point of view.

Conclusions. In this work a multi-step approach was used to evaluate the economic aspects of six heat-only boiler plant energy-recovery configurations. The aim of the developed methodology was to supply useful information to a designer. The obtained results were interesting, and they can certainly be justified in practice. In particular, the results showed a low energy-production cost for production of heat, as well as an opportunity to minimize environmental impacts. The economic analysis results, however, show that the proposed method is quite helpful, because of the considering price difference between gas and electrical energy distributions.

Key words:

Primary energy, district heating, natural gas, boiler, production, generation, optimization, minimization, costs.

This research was supported by the Government of the Russian Federation under Project No. 860 (Decree dated August, 8 2017). We thank the scholars of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», namely Professor, Dr. Sc. Anton Ganzha for the supplied data and for continuous support in the research processing.

REFERENCES

1. Panepinto D., Zanetti M. C. Municipal solid waste incineration plant: a multi-step approach to the evaluation of an energy-recovery configuration. *Waste Management*, 2018, vol. 73, pp. 332–341. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.07.036
2. Dou Y., Togawa T., Dong L., Fujii M., Ohnishi S., Tanikawa H., Fujita T. Innovative planning and evaluation system for district heating using waste heat considering spatial configuration: a case in Fukushima, Japan. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, vol. 128, pp. 406–416. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.03.006
3. Pardo Garcia N., Zubi G., Pasaoglu G., Dufo-López R. Photovoltaic thermal hybrid solar collector and district heating configurations for a Central European multi-family house. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 148, pp. 915–924. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.05.065
4. Chicherin S. V. Comparison of a district heating system operation based on actual data – Omsk city, Russia, case study. *International Journal of Sustainable Energy*, 2019, vol. 38 no. 6, pp. 603–614. DOI: 10.1080/14786451.2018.1548466
5. Terhan M., Comakli K. Energy and exergy analyses of natural gas-fired boilers in a district heating system. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 121, pp. 380–387. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.091
6. Fang T., Lahdelma R. Genetic optimization of multi-plant heat production in district heating networks. *Applied Energy*, 2015, vol. 159, pp. 610–619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.09.027
7. Franco A., Versace M. Optimum sizing and operational strategy of CHP plant for district heating based on the use of composite indicators. *Energy*, 2017, vol. 124, pp. 258–271. DOI: 10.1016/j.energy.2017.02.062

8. Dzhangirov V.A., Lelyushkin N.V., Maslov V.V. Crisis of district heating? There is the way out! *Energetik*, 2018, no. 1, pp. 3–8. In Rus.
9. Bezrukikh P., Polivoda F., Dzyuba A., Scherbakov V., Shatrov L., Nabatchikova T. Energy saving reconstruction of district heating stations with independent low-potential power generation unit. *Energy Safety and Energy Economy*, 2017, vol. 6, pp. 19–28. In Rus. DOI: 10.18635/2071–2219–2017–6–19–28
10. Tańczuk M., Skorek J., Bargiel P. Energy and economic optimization of the repowering of coal-fired municipal district heating source by a gas turbine. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 149, pp. 885–895. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.03.053
11. Khaustov S.A. Computational model of a solid fuel heating boiler. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 16–26. In Rus.
12. Trinchenko A.A., Paramonov A.P. Technical re-equipment of the BKZ-210–140–13,8 boiler on the basis of low-temperature vortex combustion technology. *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 62–74. In Rus. DOI: 10.18721/JEST.230206
13. Koroleva T.I., Arzhaeva N.V., Tarakanov O.V., Ivashchenko N.U. From the experience of reconstruction of industrial heat transfer installation using boilers on waste oil. *Regional architecture and engineering*, 2017, no. 1 (30), pp. 151–158. In Rus.
14. Baltyan V.N., Efimov N.N., Tskhyaev A.D. To the problem of boiler equipment coal plants modernization. *University News North-Caucasian Region Technical Sciences Series*, 2017, no. 1 (193), pp. 50–53. In Rus.
15. Zbaraz L.I., Chicherin S.V. Methodology of estimation of damage from emergency situation in the heat supply system. *Scientific Bulletin of Civil Engineering*, 2017, vol. 4, no. 90, pp. 218–224. In Rus.
16. Abdykalykov E., Batakanov M. Bishkek city district heating process [Teplofikatsiya g. Bishkek]. *Herald of Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*, 2017, vol. 44, no. 4, pp. 14–20.
17. Novoseltsev B.P. Some aspects of improving the quality of heat supply of buildings. *Housing and communal infrastructure*, 2017, no. 3 (2), pp. 22–26. In Rus.
18. Egorov A.N., Krivolapova E.V., Butrimova N.V., Egorov A.A. To the issue of efficiency and ecological safety of heat power systems. *Herald of Orenburg State University*, 2017, vol. 212, no. 12, pp. 94–97. In Rus.
19. Zbaraz L.I. Modelling of the decentralized source of the heat supply and choice of optimum parameters of its work. *Municipal economy of cities*, 2015, no. 123, pp. 91–97. In Rus.
20. Chicherin S., Volkova A., Latõšov E. GIS-based optimisation for district heating network planning. *Energy Procedia*, 2018, vol. 149, pp. 635–641. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.107

Received: 11 September 2018.

Information about the authors

Leonid I. Zbaraz, Cand. Sc., associate professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute».
Stanislav V. Chicherin, postgraduate student, Omsk State Transport University.

УДК 550.42 (571.55)

ИСТОЧНИКИ РУДОНОСНЫХ ФЛЮИДОВ Au, Mo, W и Pb-Zn МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ (ПО ДАННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКИХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ)

Абрамов Баир Намжилевич,
b_abramov@mail.ru.

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
Россия, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а, а/я 1032.

Актуальность работы состоит в том, что представленные данные об источниках рудоносных флюидов разнотипных мезозойских месторождений Восточного Забайкалья, на основе анализа распределения редкоземельных элементов и индикаторных отношений редких и редкоземельных элементов в рудах, позволят получить новые знания о природе рудообразования.

Цель работы состоит в выяснении особенностей распределения рудных и редкоземельных элементов в рудах различных типов месторождений, образованных за счет разноглубинных рудоносных флюидов.

Методы. Для определения элементного состава пород использовался рентгенфлуоресцентный метод анализа (ГИН СОРАН, г. Улан-Удэ). Концентрации редкоземельных элементов определялись методом сорбционно-атомно-эмиссионного анализа с индуктивно-связанной плазмой (ГИН СОРАН, г. Улан-Удэ).

Результаты. Установлено, что источниками руд Александровского, Итакинского, Карийского золоторудных, Бугдаинского и Жирекенского молибденовых, Букуинского вольфрамового месторождений были разноглубинные, в разной степени дифференцированные рудоносные магматические источники. Наличие разноглубинных источников оруденения подтверждается индикаторными отношениями Eu/Sm , U/Th , Hf/Sm и Nb/La . Выявлено, что в золоторудных месторождениях в рудах, образованных из магматических источников верхней континентальной коры, относительно руд, источниками которых были рудоносные флюиды нижней континентальной коры, отмечаются повышенные концентрации халькофильных элементов (Cu , Ag , Bi , Sb , Pb) и пониженные содержания лантаноидов. В молибденовых месторождениях в рудах из магматических источников нижней континентальной коры, в сравнении с рудами, образованными в верхней континентальной коре, отмечаются повышенные содержания как халькофильных элементов, так и лантаноидов. В полиметаллических месторождениях в части молибденовых и вольфрамовых месторождений функционировал только один рудоносный магматический источник, действовавший в верхней или в нижней континентальной коре.

Ключевые слова:

Рудные месторождения, рудоносные флюиды, верхняя и нижняя континентальная кора, индикаторные отношения элементов, редкоземельные элементы, Восточное Забайкалье.

Введение

Изучение фракционирования редкоземельных элементов (РЗЭ) и индикаторных отношений редких и редкоземельных элементов в рудах имеет важное значение для понимания условий образования различных по составу руд.

К числу основных задач исследования относится изучение особенностей распределения редких и РЗЭ в рудах разнотипных месторождений, образованных из разноглубинных магматических флюидов. Для решения этой задачи использованы индикаторные отношения элементов, позволяющие оценить глубины формирования, степень дифференциации рудоносных флюидов. Анализ концентраций элементного состава в рудных жилах различных типов месторождений, особенности распределения РЗЭ, индикаторных отношений элементов позволили выявить общие и отличительные особенности источников металлоносных растворов, участвовавших в формировании руд разнотипных месторождений Восточного Забайкалья.

Фактический материал, методы исследования

В основу статьи положен фактический материал, собранный автором в процессе тематических исследований по программам Института природ-

ных ресурсов, экологии и криологии СО РАН в 1998–2017 гг., опубликованные данные, а также материалы территориальных геологических фондов (г. Чита). Полевые исследования проводились на территориях Средне-Голготайского, Талатуйского, Верхне-Алиинского, Ключевского, Карийского и Любавинского золоторудных месторождений; Шерловогорского и Хапчерангинского олово-полиметаллических месторождений; Кличкинского, Нойон-Тологойского, Ново-Широкинского и Акатуевского полиметаллических месторождений; Давендинского, Шахтаминского и Бугдаинского молибденовых месторождений; Букуинского и Антоновгорского вольфрамовых месторождений. Распределение РЗЭ изучалось в пробах, отобранных из руд продуктивных стадий рудообразования, различных типов месторождений. Пробы, представленные сульфидно-кварцевыми жилами, отбирались в рудных карьерах, горных выработках (канавках) рудных зон рассматриваемых месторождений. Количество сульфидов в рудах в среднем составляет 10–30 %. В рудах продуктивных стадий рассматриваемых месторождений отмечается следующий состав рудных минералов (от главных к менее распространенным): Александровское – пирит, халькопирит, висмутин, тетра-

эдрит; Итакинское – пирит, арсенопирит, антимонит, сфалерит; Карийское – магнетит, гематит, халькопирит, пирит; Талатуйское – магнетит, пирит, молибденит, халькопирит; Ключевское – пирит, арсенопирит, халькопирит, блеклые руды; Любавинское – пирит, арсенопирит, халькопирит; Бугдаинское – молибденит, пирит, халькопирит, сфалерит; Жирекенское – молибденит, халькопирит, галенит, сфалерит; Шахтаминское – молибденит, пирит, сфалерит, галенит; Букукинское – вольфрамит, пирит, сфалерит; Антоновогорское – вольфрамит, пирит, халькопирит, молибденит; Ново-Широкинское – сфалерит, галенит, пирит; Нойон-Тологойское – галенит, сфалерит, пирит, арсенопирит; Шерловогорское – касситерит, арсенопирит, пирротин; Хапчерангинское – касситерит, арсенопирит, пирит.

Изучение элементного состава пород и руд проведено в аналитических лабораториях Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ). Содержание элементов определено РФА методом (аналитик Б.Ж. Жалсараев). Измерение концентраций редкоземельных элементов проведено ICP-AES методом (аналитики Т.И. Казанцева, А.А. Цыренова).

Схема районирования и типы минерализации рудных месторождений Восточного Забайкалья

Восточное Забайкалье характеризуется большим многообразием типов рудных месторождений, образование которых связывается с процессами формирования разновозрастных разнотипных рудно-магматических систем. В значительной части эти процессы связаны с коллизионными и постколлизионными процессами, происходившими на рубеже поздней-средней юры при столкновении Сибирского и Монголо-Китайского континентов [1]. Эти процессы сопровождалась формированием рудоносных вулкано-плутонических комплексов. Ранее установлено, что основными источниками золота, молибдена, полиметаллов были интрузивные комплексы амуджикано-шахтаминского (J_{2-3}) и амананского интрузивных комплексов (J_{2-3}). Образование олово-вольфрамового оруденения связано с процессами образования интрузий кукульбейского (J_3) комплекса [2, 3].

С.С. Смирновым в 30-х гг. XX в. в Восточном Забайкалье было выделено три металлогенических пояса: оловянно-вольфрамовый, молибденово-золотой и полиметаллический [4]. В пределах золото-молибденового пояса отмечается близкая пространственная совмещенность молибденовой и золоторудной минерализации [2].

На современных схемах районирования на территории Восточного Забайкалья выделяются следующие рудные поля: 1 – R-Fe-Cu; 2 – R-Mo-W; 3 – Mo-Au; 4 – Sn-W; 5 – U-Au-Pb-Zn (рис. 1) [5]. В пределах этих полей не всегда выдерживается соответствие данной схеме. Так, Шахтаминское и Бугдаинское молибденовые месторождения находятся в пределах оловянно-вольфрамового пояса. При решении проблем металлогенического райониро-

вания многие исследователи не находили ясного ответа. По последним данным причина этих несоответствий объясняется размещением рудных объектов над фронтальной частью стагнированного слэба, расположенного в транзитной зоне мантии, и соответствующего ей линейного магматического ареала. Модели такого процесса описаны в работах [5–7].

В последние десятилетия по результатам новых идей мобилизма, данным сейсмотомографических исследований, изучением глубинного строения Восточного Забайкалья установлено, что образование рудно-магматических систем в регионе связывается с воздействием в переходной зоне мантии стагнированного океанического слэба на литосферу, воздействие которого происходило в среднеюрский-раннемеловой период [8, 9]. При этом образование разнотипного оруденения связывается с длительным воздействием (J_2 – K_1) мантийных потоков в низы литосферы с формированием разновозрастных рудоносных магматических очагов [6, 10–13]. Установлена пространственная приуроченность рудных месторождений к зонам глубинных нарушений.

В золоторудных месторождениях молибденовая минерализация типична для ранних высокотемпературных ассоциаций, золоторудная минерализация – для последующих ассоциаций с меньшими температурами образования. Для преобладающей части молибденовых месторождений характерны комплексные золото-молибденовые руды (Бугдаинское, Давендинское месторождения).

Золоторудные месторождения. Золоторудные месторождения Восточного Забайкалья характеризуются длительной историей формирования. Основными источниками золота в этих месторождениях были глубокодифференцированные плутонические и вулканоплутонические производные шпонит-латитовой и известково-щелочной магм [2]. Образование мезозойских золоторудных и молибденовых месторождений тесно связано с процессами формирования интрузий амуджикано-шахтаминского комплекса, абсолютный возраст которых по разным источникам колеблется в интервале 180–111 млн лет. Преобладающие значения отмечаются в интервале 147–144 млн лет [2]. На месторождениях, как правило, выделяется несколько стадий рудообразования, различающихся составами рудной минерализации.

Любавинское месторождение. Рудные тела Любавинского месторождения представлены рудоносными кварцевыми жилами. По составу руды относятся к малосульфидному золото-кварцевому типу. Количество сульфидов в жилах составляет 2–3 % с резким преобладанием арсенопирита и пирита. На месторождении выделены следующие типы минерализации: полевошпат-кварцевая, золото-малосульфидная (продуктивная), полиметаллическая, антимонитовая [14].

Талатуйское месторождение. Рудные тела Талатуйского месторождения представлены минера-

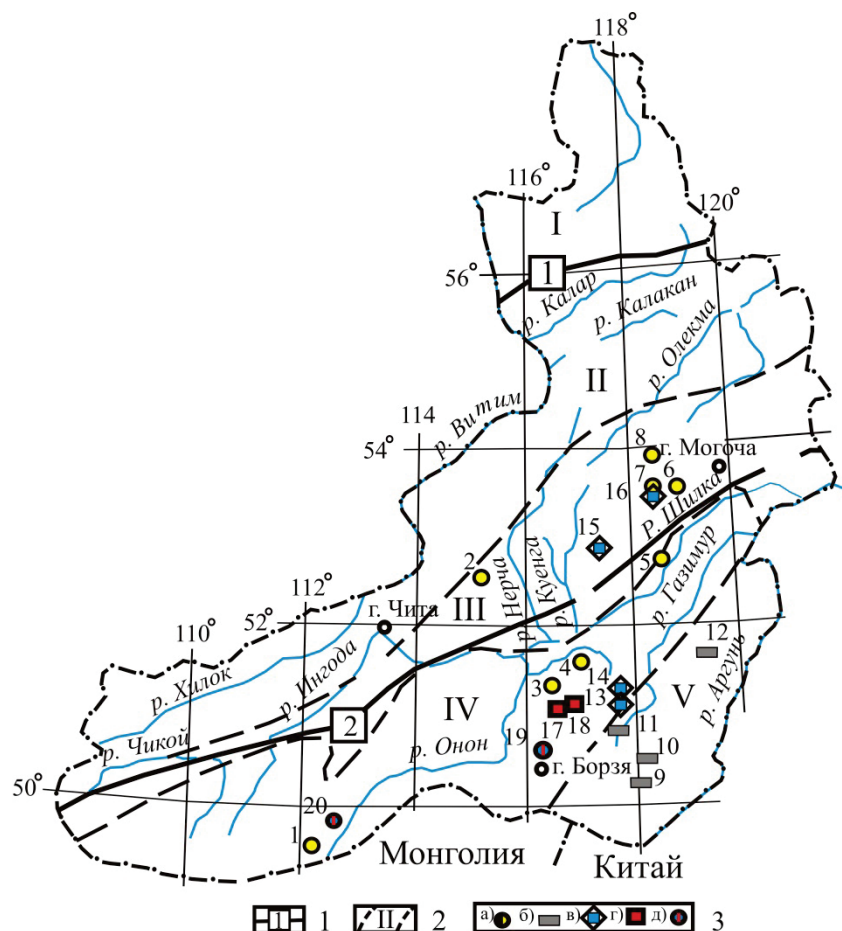


Рис. 1. Схема металлогенического районирования Восточного Забайкалья [5]: 1 – крупные тектонические зоны (цифры в квадрате): 1 – Становая, 2 – Монголо-Охотская; 2 – рудные пояса: I – редкометалльно-железо-медный, II – редкометалльно-молибденово-вольфрамовый, III – молибденово-золотой, IV – оловянно-вольфрамовый, V – уран-золото-полиметаллический; 3 – месторождения: а) золоторудные: 1 – Любавинское, 2 – Талатуйское, 3 – Средне-Голготайское, 4 – Верхне-Алиинское, 5 – Карийское, 6 – Ключевское, 7 – Александровское, 8 – Итакинское; б) полиметаллические: 9 – Кличкинское, 10 – Нойон-Тологойское, 11 – Акатуевское, 12 – Ново-Широкинское; в) молибденовые месторождения: 13 – Бугдаинское, 14 – Шахтаминское, 15 – Жирекенское, 16 – Давендинское; г) вольфрамовые: 17 – Букукинское, 18 – Антоновозорское; д) олово-полиметаллические: 19 – Шерловогорское, 20 – Ханчалангинское

Fig. 1. Scheme of metallogenetic zoning of Eastern Transbaikalia [5]: 1 – large tectonic zones (numbers in the square): 1 – Stanovaya, 2 – Mongol-Okhotsk; 2 – ore belts: I – rare metal-iron-copper, II – rare metal-molybdenum-tungsten, III – molybdenum-gold, IV – tin-tungsten-rare metal, V – uranium-gold-polymetallic; 3 – deposits: a) gold: 1 – Lubavinsky, 2 – Talatuiy, 3 – Sredne-Golgotaysky, 4 – Verkhne-Aliinsky, 5 – Kariysky, 6 – Kluchevsky, 7 – Aleksandrovsky, 8 – Itakinsky; b) polymetallic: 9 – Klichkinsky, 10 – Noyon-Tologoy, 11 – Akatuevsky, 12 – Novo-Shirokinsky; c) molybdenum Deposit: 13 – Bugdainsky, 14 – Shakhhtaminsky, 15 – Zhireken, 16 – Daven-dinsky; d) tungsten: 17 – Bukukinsky, 18 – Antonovogorsky; e) tin-polymetallic: 19 – Sherlovogorsky, 20 – Kharperanginsky

лизованными зонами дробления и расланцевания пород мощностью до 11 м, сульфидно-кварцевыми жилами. На месторождении выделяются четыре стадии рудообразования: 1) кварц-турмалин-магнетитовая. Основные рудные минералы представлены магнетитом, рутилом, ильменитом; 2) кварц-молибденитовая, образованная кварц-молибденитовыми жилами; 3) золото-полисульфидная. К числу наиболее распространенных рудных минералов относятся: пирит, халькопирит, арсенопирит, висмутин. Менее развито самородное золото; 4) халцедон-карбонатная.

Средне-Голготайское месторождение. На месторождении рудные тела представлены жилами

золото-кварцевого и золото-сульфидно-кварцевого составов. В жилах золото-кварцевого типа количество рудных минералов составляет 1–2 %. Наиболее распространенными рудными минералами являются пирит и арсенопирит. В меньших количествах отмечаются халькопирит, пирротин, молибденит, висмутин.

Верхне-Алиинское месторождение. На месторождении выделены Западная, Восточная и Широкая рудные зоны. Рудные тела в них представлены золото-сульфидно-кварцевыми жилами и прожилково-вкрапленными зонами, основными рудными минералами в которых являются арсенопирит, пирит и пирротин. Менее распространен-

ными рудными минералами являются халькопирит, галенит, сфалерит, блеклая руда, марказит, антимонит. Вмещающие породы представлены монцонитами амуджикано-шахтаминского комплекса (J_{2-3}) [15].

Карийское месторождение. Вмещающие породы представлены протерозойскими метаморфическими образованиями и интрузиями амананского комплекса (J_2). Всего на месторождении насчитывается 23 рудные зоны, имеющие северо-западное простирание. По данным предшествующих исследований формирование золотого оруденения происходило в четыре стадии с образованием следующих продуктивных ассоциаций: I – кварц-пирит-турмалиновая; II – кварц-актинолит-магнетитовая; III – сульфидно-кварцевая; IV – полиметаллическая. Последние две стадии имеют незначительные масштабы проявления. Наиболее продуктивной является кварц-актинолит-магнетитовая ассоциация.

Ключевское месторождение. Основным рудным телом на месторождении является штокверк с отдельными жилами и прожилково-вкрапленной минерализацией. Штокверк сложен кварц-турмалиновыми, турмалин-пиритовыми жилами и прожилками, брекчиями вмещающих пород. Отмечаются следующие стадии рудообразования: 1) молибденит-кварцевая с калишпатизацией; 2) сульфидно-кварц-турмалиновая с калишпатизацией; 3) кварц-турмалин-сульфидная с альбитизацией; 4) полиметаллическая; 5) карбонатная с халцедоном [16].

Александровское месторождение. Рудные тела представлены сульфидно-кварцевыми жилами и зонами прожилково-вкрапленной минерализации. На месторождении выделены следующие минеральные ассоциации в порядке их проявления: 1) молибденит-кварцевая; 2) кварц-турмалиновая; 3) висмутин-кварцевая; 4) пирит-кварцевая с золотом; 5) золото-кварц-полиметаллическая; 6) кварц-карбонатная. Наиболее распространенным рудным минералом является пирит, меньше встречаются халькопирит, висмутин, тетраэдрит, борнит.

Итакинское месторождение. На месторождении выделяются пять разновозрастных минеральных ассоциаций: 1) кварц-пирит-молибденитовая, 2) кварц-арсенопиритовая (первая продуктивная), 3) кварц-полиметаллическая (вторая продуктивная), 4) кварц-антимонитовая, 5) кварц-флюоритовая. Рудные минералы первой ассоциации представлены молибденитом, магнетитом, ритилом, ильменитом; второй ассоциации – пиритом, пиротином, марказитом; третьей ассоциации – сфаленитом, галенитом, халькопиритом, висмутином, джемсонитом; четвертой ассоциации – антимонитом, киноварью; пятой ассоциации – флюоритом.

Молибденовые месторождения. Молибденовые месторождения Восточного Забайкалья характеризуются длительной историей формирования.

На месторождениях, как правило, выделяется несколько стадий рудообразования, которые отличаются составами рудной минерализации. Образование молибденового оруденения связано с процессами формирования рудоносного порфирового комплекса гранитоидов амуджикано-шахтаминского (J_{2-3}) и амананского (J_{2-3}) комплексов. Определён изохронный Re–Os возраст молибденитов Жирекенского месторождения, составляющий 163 ± 1 млн лет, Шахтаминского месторождения – 159 ± 1 млн лет [17]. Эти данные соответствуют возрасту интрузий амуджикано-шахтаминского комплекса.

Шахтаминское месторождение. Образование рудных тел месторождения происходило в два этапа. Рудные тела первого этапа представлены жилами кварц-молибденитового состава, рудные тела второго этапа – жилами кварц-полиметаллического состава. В промежуточный период между этими этапами происходило внедрение даек различного состава. Наиболее распространенными рудными минералами жил кварц-молибденитового состава являются: пирит, молибденит, реже отмечаются шеелит, халькопирит. В жилах кварц-полиметаллического состава основными рудными минералами являются: галенит, сфалерит, менее развиты блеклые руды, бурнотит [18].

Бугдаинское месторождение. На месторождении выделяются две основные рудные стадии: кварц-молибденитовая и золото-полиметаллическая. Основные рудные минералы кварц-молибденитовой стадии представлены пиритом, молибденитом. К числу второстепенных относятся волфрамит, шеелит. Наиболее распространенные рудные минералы золото-полиметаллической стадии представлены пиритом, сфалеритом, галенитом, реже отмечаются молибденит, арсенопирит, халькопирит, блеклые руды, золото [19].

Жирекенское месторождение. На месторождении выделяются вкрапленный, прожилковый и брекчиевый типы руд. Основные запасы молибдена связаны с вкрапленным типом руд, отмечаемых преимущественно в центральной и южной части месторождения. Прожилково-вкрапленные руды приурочены к флангам рудных зон. По составу они подразделяются на молибденитовые, кварц-молибденитовые с примесью пирита и халькопирита, а также мусковит-серицит-кварцевые прожилки с молибденитом, пиритом, халькопиритом, галенитом, сфалеритом. Брекчиевые типы руд имеют незначительное распространение. В пределах брекчиевой рудной зоны отмечаются ксенолиты калишпатизированных метасоматитов с вкрапленным оруденением и содержанием молибденита до 30 % [20].

Давендинское месторождение. В кварц-молибденитовых жилах основными рудными минералами являются молибденит и пирит, составляющие 95 % общего количества рудных минералов. К числу второстепенных рудных минералов относятся: халькопирит, висмутин, сфалерит, галенит, маг-

нетит. К числу редких рудных минералов относятся: блеклые руды, золото, тетрадимит, борнит, касситерит, шеелит, пирротин и марказит. На месторождении выделяются следующие рудные стадии минерализации: кварц-молибденитовая, кварц-турмалиновая, кварц-золото-висмутовая.

Полиметаллические месторождения. В Восточном Забайкалье известно более 300 свинцово-цинковых месторождений и проявлений. Характерной особенностью данных месторождений является их групповое размещение в тесной пространственной ассоциации с интрузивными и эффузивными образованиями, объединенными в единые вулканоплутонические комплексы [21].

Кличкинское месторождение. На месторождении отмечаются следующие типы рудных тел: пластообразные, трубообразные, жилообразные, линзовидные. Рудообразование происходило в три стадии: скарновую, сульфидную (продуктивную) и цеолит-флюорит-карбонатную. В сульфидной стадии выделяются следующие рудные ассоциации (в порядке образования): пирит-арсенопирит-пирротиновая, сфалерит-пиритовая, сфалерит-галенитовая и сульфоантимонитовая. Наиболее распространенными рудными минералами являются: пирротин, пирит, сфалерит, галенит, менее развиты халькопирит, арсенопирит, марказит, редкие – сульфоантимониты, станнин, самородное золото и серебро.

Нойон-Тологойское месторождение. На месторождении рудные тела имеют пластообразную, штокверкоподобную и жильную формы. В рудных телах наиболее распространенными минералами являются: пирит, арсенопирит, галенит и сфалерит. Менее развиты буланжерит, тетраэдрит, фрейбергит и др. Анализ взаимоотношений рудных минералов позволяет выделить следующую последовательность их выделения: арсенопирит+пирит→галенит+сфалерит→буланжерит [21].

Акатувевское месторождение. На месторождении выделяются следующие типы рудных тел: трубообразные, линзообразные, жильные и прожилково-вкрапленные. В составе рудных тел развиты следующие рудные ассоциации: пирит-арсенопиритовая, пирит-сфалеритовая, галенит-сфалеритовая, кварц-арсенопирит-буланжеритовая, кварц-карбонатно-кварцевая. Наиболее распространенными рудными минералами являются: пирит, сфалерит, галенит, менее распространены арсенопирит, халькопирит, буланжерит. Редкие рудные минералы представлены станнином, бурнонитом, пирротинном.

Ново-Широкинское месторождение. На месторождении выделены следующие стадии рудного процесса: турмалин-колчеданная, медисто-сернисто-колчеданная, кварцевая полиметаллическая, карбонатно-полиметаллическая. На месторождении развито 15 рудных тел. Наиболее распространенными рудными минералами в них являются: пирит, сфалерит, галенит, второстепенные пред-

ставлены халькопиритом, редкие – мельниконитом, молибденитом, золотом, бурнонитом, джемсонитом, арсенопиритом, висмутином, марказитом [22].

Месторождения цветных металлов. Из числа месторождений цветных металлов Восточного Забайкалья рассмотрим рудные вольфрамовые месторождения Букукинское и Антоновогорское. Их образование связано с процессами формирования кукульбейского интрузивного комплекса (J₃) [3].

Букукинское месторождение. Рудные тела Букукинского месторождения представлены сульфидно-кварцевыми жилами. На месторождении выделяются три стадии минералообразования: 1) кварц-молибденит-висмутин-вольфрамитовая, 2) кварц-галенит-вольфрамитовая, 3) халцедон-флюоритовая. Рудные минералы первой стадии сложены молибденитом, вольфрамитом, пиритом, сфалеритом, висмутином, пирротинном. Рудные минералы второй стадии представлены вольфрамитом, пиритом, сфалеритом, третьей стадии – арсенопиритом, пиритом, флюоритом.

Антоновогорское месторождение. Рудные тела Антоновогорского месторождения представлены кварц-вольфрамитовыми жилами протяженностью от 30 до 670 м, при средней мощности жил 0,3 м. Всего насчитывается около 200 параллельных рудных жил, имеющих северо-восточное простирание. Наиболее распространенными рудными минералами являются: вольфрамит, пирит, халькопирит. Реже встречаются молибденит, висмутин, касситерит. Редкие рудные минералы представлены флюоритом, сфалеритом, галенитом.

Олово-полиметаллические месторождения. Образование олово-полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья тесно связано с процессами формирования интрузий кукульбейского интрузивного комплекса (J₃) [3].

Шерловогорское месторождение. На Шерловогорском месторождении выделяются две минеральные ассоциации: турмалин-сульфидная (наиболее ранняя) и сульфидная. Турмалин-сульфидная ассоциация локализуется в зоне меридионального разлома и представлена кварцем, турмалином, топазом, флюоритом, касситеритом, арсенопиритом и пиритом. Сульфидная ассоциация отмечается, преимущественно, в пределах «Восточного полиметаллического поля». Она представлена касситеритом, арсенопиритом, пирротинном, сфалеритом, галенитом, халькопиритом, пиритом, блеклой рудой, марказитом.

Хапчерангинское месторождение. Рудные тела Хапчерангинского месторождения подразделяются на кварцево-сульфидные жилы и хлоритизированные зоны дробления. По составу рудные жилы подразделяются на кварц-касситерит-пиритовые, кварц-касситерит-арсенопиритовые, кварц-пирит-пирротиновые, кварц-касситерит-хлоритовые, кварц-сфалерит-галенитовые. В зонах дробления отмечаются грейзенизированные редкометалльные рудные тела.

Распределение редких и редкоземельных элементов в рудах различных типов мезозойских месторождений Восточного Забайкалья

Редкоземельные элементы рассматриваются как геохимические индикаторы геологических, в том числе магматических, процессов. Изучение распределения РЗЭ, их соотношений дает возможность судить о степени дифференциации магматических очагов, глубинах их функционирования, условиях и источниках образования оруденения.

Установлено, что мезозойские рудно-магматические системы в Восточном Забайкалье образованы в результате коллизии при столкновении Сибирского и Монголо-Китайского континентов [1]. При этом в ходе мантийно-корового взаимодействия при движении флюидных потоков в низы литосферы происходило образование разноуровневых рудоносных магматических очагов.

Наличие разноглубинных рудоносных источников оруденения в разнотипных месторождениях подтверждается индикаторными отношениями Eu/Sm , U/Th , Hf/Sm и Nb/La [23]. Отличие значений индикаторных отношений элементов проявляется в рудах Александровского, Итакинского, Карийского золоторудных месторождений, Бугдаинского и Жирекенского молибденовых и Букуинского вольфрамового месторождений.

Формирование мезозойских золоторудных, молибденовых и полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья связывается с интрузивными образованиями, главным образом, шахтаминского комплекса (J_{2-3}); вольфрамитовых и олово-полиметаллических месторождений – с интрузиями кукульбейского комплекса (J_3) [3]. Связь мезозойского магматизма с оруденением установлена для Бугдаинского [19], Шахтаминского и Жирекенского молибденовых месторождений [18, 20], Ново-Широкинского полиметаллического [22] и Любавинского золоторудного месторождений [14].

Установлено, что руды молибденовых месторождений в сравнении с рудами золоторудных месторождений характеризуются меньшими содержаниями РЗЭ и более высокими концентрациями тяжелых РЗЭ [24]. Известно, что концентраторами тяжелых РЗЭ являются темноцветные минералы (гранаты, амфиболы). Можно предположить, что источниками рудоносных флюидов молибденовых месторождений в сравнении с источниками золоторудных месторождений были магматические образования основного состава в большей степени [25].

Образование разноуровневых рудно-магматических систем в процессе мантийно-корового взаимодействия установлено для золоторудных и вольфрамовых месторождений [26, 27]. Наличие в рудных полях золоторудных месторождений синрудных дайковых образований (лампрофиры, диабазы) свидетельствует о существовании магматических очагов основного состава, участвовавших в образовании флюидно-магматических систем [26].

По индикаторным отношениям Eu/Sm , U/Th в рудах различных типов месторождений выделим

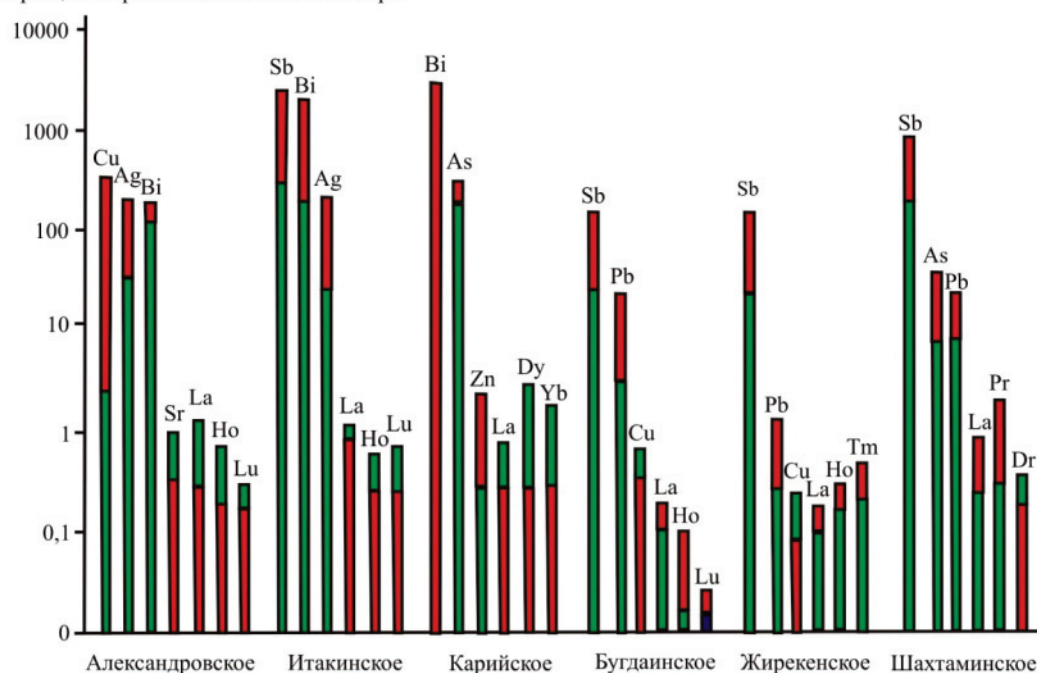
разноглубинные рудоносные магматические источники. Условно, по глубинам образования, назовем их «верхний» и «нижний». Под «верхним» слоем подразумевается гранитный слой, по «нижнему» – базальтовый слой.

Изучение глубинного строения Восточного Забайкалья с применением интерпретации аномалий гравитационного поля в редукции Буге показало, что земная кора имеет трехчленное строение. Выявлено, что мощность земной коры колеблется в пределах 38–48 км [28]. Установлено, что нижняя часть разреза земной коры представлена «базальтовым слоем», расположенным выше границы Моховича. Состав «базальтового» слоя по Г.И. Менакеру представлен метагабброидами и гипербазитами с включениями эглогитоподобных пород [29]. Определено, что верхняя часть разреза земной коры состоит из гранитного слоя с участками распространения интрузивных, осадочных и вулканогенно-осадочных пород. Мощность гранитного слоя меняется от сотен метров, где развиты вулканогенно-осадочные породы впадин, до 25 км на участках развития гранитоидов. Между условными гранитным и базальтовым слоем выделен переходный «мафитовый слой». Этот слой имеет, вероятно, мафитовый состав в соответствии с его магнитными свойствами, который определяется повышенными концентрациями железо-магниевого минералов. Мощность мафитового слоя колеблется от 4 до 15 км [28]. Установлено, что крупные рудные узлы приурочены к поднятиям мафитового слоя, особенно к экзо- и эндоконтактам этих поднятий. Отмечается корреляция оруденения с поднятиями мафитового слоя до 1–3 км от поверхности [28]. По данным сейсмотомографических исследований выявлено, что для региона характерно наличие в переходной зоне мантии стагнированного океанического слэба, возникновение которого обусловлено субдукционными процессами в среднеюрско-раннемеловой период [8]. Воздействие слэба проявлено в наличии эшелонированно расположенных куполообразных поднятий и межкупольных прогибов поверхности Мохо [28].

Между рудоформирующими магматическими очагами и гидротермальными системами существуют значительные пространственные, временные, термодинамические, гидродинамические и геохимические различия, соотношения и далеко не прямые связи. Исходим из того, что состав руд в гидротермальной системе соответствует составу рудоносных флюидов.

Для оценки глубин формирования рудоносных магматических очагов используются Eu/Sm отношения в трактовке С.В. Винокурова [30]. $Eu/Sm < 0,2$ соответствует магматическим очагам, образованным в верхней континентальной коре, $Eu/Sm > 0,2$ – сформированным в нижней континентальной коре. Косвенно о глубинности функционирования магматических очагов можно судить по значениям европиевого минимума – чем меньше значения Eu/Eu^* , тем более был дифференци-

Образцы / Верхняя континентальная кора



Образцы / Верхняя континентальная кора

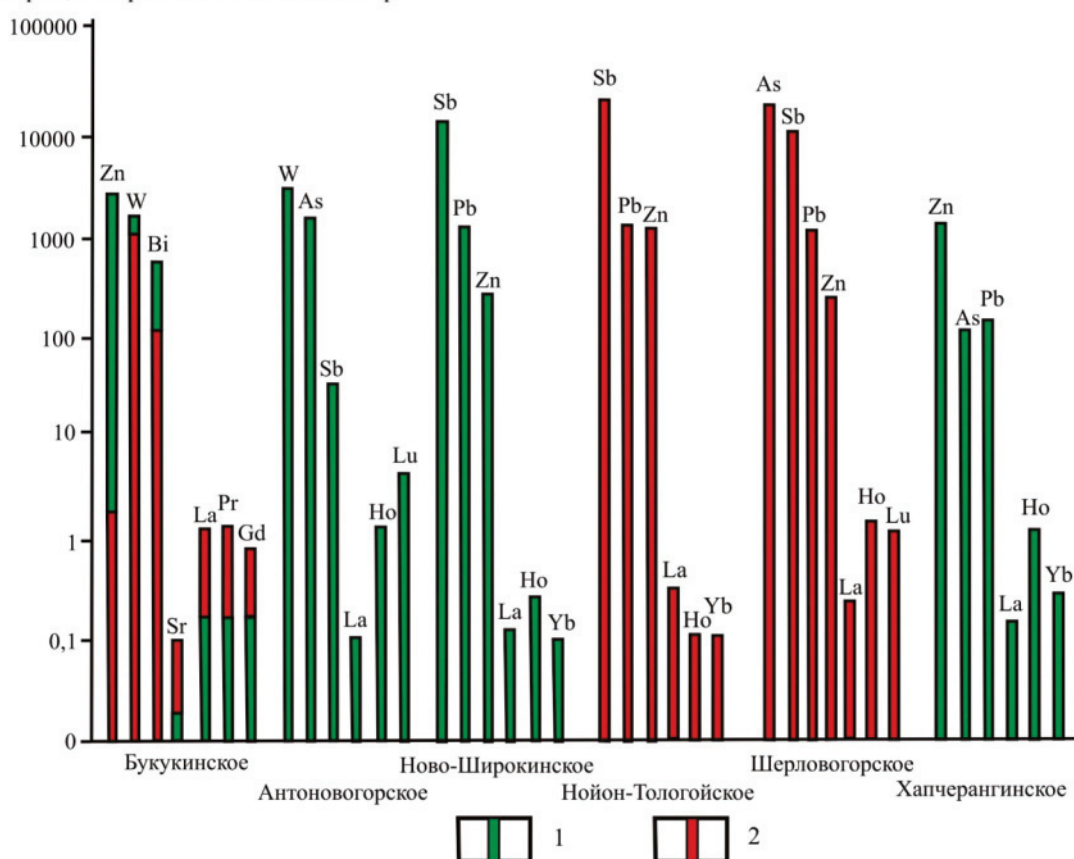


Рис. 2. Распределение основных микроэлементов в рудах различных типов месторождений Восточного Забайкалья, нормированных по отношению к средним значениям для верхней континентальной коры [38]. Концентрации микроэлементов в рудах, источниками которых являлись рудоносные флюиды: 1 – нижней континентальной коры, 2 – верхней континентальной коры

Fig. 2. Distribution of the main trace elements in ores of different types of deposits, Eastern Transbaikalia, normalized against the average values for the upper continental crust [38]. Concentrations of trace elements in ores, the sources of which were ore-bearing fluids: 1 – the lower continental crust, 2 – the upper continental crust

рован магматический очаг. Минимальные значения европиевого минимума характерны для лейкогранитных дифференциатов. Отрицательная Eu аномалия в породе, как правило, указывает на образование породы в пределах верхней континентальной коры, положительная Eu аномалия – в нижней континентальной коре. Отсутствие европиевого минимума указывает на незначительное фракционирование плагиоклаза в расплаве.

Установлено, что если значения $U/Th < 0,75$, это указывают на окислительную среду рудообразования, $0,75–1,25$ – на нейтральную, $>1,25$ – на восстановительную [31]. Совокупность этих данных характеризует уровни зарождения рудоносных магматических очагов. Установлено, что в рудах значение Co/Ni более 1,5 указывает на участие магматического флюида [32]. В рудах в гидротермальных флюидах, содержащих хлор, значения Hf/Sm , Nb/La и Th/La , преимущественно, меньше единицы, а во флюидах, обогащенных фтором, – больше единицы [32, 33]. Значения Y/No отношений позволяют оценивать происхождение рудообразующих флюидов [34]. Преобладающие значения Y/No отношений золоторудных месторождений 22–32 соответствуют значениям флюидов гидротермальных систем Восточно-Тихоокеанского рифта [35] и флюидов, образованных в результате регионального зеленокаменного метаморфизма вмещающих пород [36, 37].

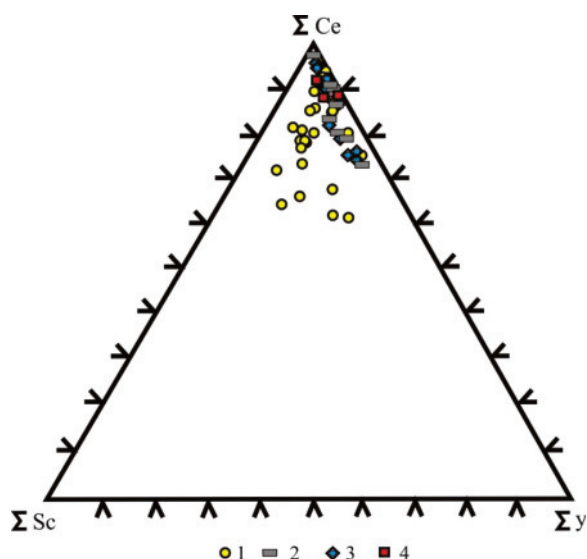


Рис. 3. Диаграмма $\Sigma Sc-\Sigma Ce-\Sigma Y$ руд разнотипных месторождений Восточного Забайкалья. 1 – руды золоторудных месторождений, 2 – руды полиметаллических месторождений, 3 – руды молибденовых месторождений, 4 – руды вольфрамовых месторождений. $\Sigma Ce = \Sigma (La-Nd)$, $\Sigma Y = \Sigma (Sm-Ho)$, $\Sigma Sc = \Sigma (Er-Lu)$ по [39]

Fig. 3. Diagram $\Sigma Sc-\Sigma Ce-\Sigma Y$ of ores of different types of deposits in Eastern Transbaikalia. 1 – ores of gold deposits, 2 – ores of polymetallic deposits, 3 – ores of molybdenum deposits, 4 – ores of tungsten deposits. $\Sigma Ce = \Sigma (La-Nd)$, $\Sigma Y = \Sigma (Sm-Ho)$, $\Sigma Sc = \Sigma (Er-Lu)$ [39]

Концентрации элементов в рудах, образованных из магматических источников верхней и нижней континентальной коры, имеют следующие отличия:

- 1) в золоторудных месторождениях в рудах, образованных из магматических источников верхней континентальной коры, относительно руд, источниками которых были магматиты нижней континентальной коры, отмечаются повышенные концентрации халькофильных элементов (Cu, Ag, Bi, Sb, Pb) и пониженные содержания лантаноидов (рис. 2);
- 2) для молибденовых месторождений в рудах, образованных из рудоносных флюидов нижней континентальной коры, относительно руд, источниками которых были рудоносные флюиды верхней континентальной коры, отмечаются повышенные содержания как халькофильных элементов, так и лантаноидов (рис. 2);
- 3) для Букуинского вольфрамового месторождения в рудах, источниками которых были рудоносные флюиды нижней континентальной коры, относительно руд, образованных из рудоносных флюидов верхней континентальной коры, отмечаются повышенные содержания халькофильных элементов и пониженные содержания лантаноидов (таблица, рис. 2). На наличие разнотипных рудоносных магматических источников Жирекенского месторождения указывают следующие факты: 1) для «верхнего» рудоносного уровня Eu/Sm составляют 0,10–0,19; для «нижнего» рудоносного уровня – 0,27–0,86; 2) отношения U/Th для «верхнего» рудоносного уровня составляют 0,23–0,52, для «нижнего» рудоносного уровня – 1,36–2,11. Магматические очаги «верхнего» уровня характеризуются окислительными обстановками формирования, «нижнего» уровня – восстановительными обстановками формирования. Для Александровского золоторудного месторождения «верхний» рудоносный уровень характеризуется значениями Eu/Sm – 0,15–0,17; U/Th – 0,44–0,64. «Нижний» рудоносный уровень имеет значения 0,20–0,26; U/Th – 0,44–1,08. Эти данные свидетельствуют о функционировании магматических источников «верхнего» рудоносного уровня в окислительной обстановке, «нижнего» рудоносного уровня – в окислительно-нейтральной обстановке. Руды, образованные за счет рудоносных магм «верхнего» уровня, в сравнении с рудами «нижнего» уровня, более дифференцированы.

Анализ диаграммы распределения сумм легких, средних и тяжелых РЗЭ в рудах разнотипных месторождений Восточного Забайкалья выявил, что руды золоторудных месторождений в сравнении с рудами молибденовых, полиметаллических и вольфрамовых месторождений характеризуются более значительными концентрациями легких РЗЭ (рис. 3). Это можно объяснить тем, что руды золоторудных месторождений относительно руд

Таблица. Средние содержания микроэлементов в рудах (г/т) и их отношения в разнотипных месторождениях Восточного Забайкалья
Table. Average content of trace elements in ores (g/t) and their ratios in different types deposits of Eastern Transbaikalia

Элементы и их соотношения Elements and their ratios	Месторождения/Deposit														
	Золоторудные Gold ore						Молибденовые Molybdenum			Вольфрамовые Tungstic		Полиметаллические, олово-полиметаллические Polymetallic, tin-polymetallic			
	Александровское Aleksandrovsky	Итакинское Itakinsky	Карийское Kariysky	Талатуйское Talatuyksky	Ключевское Kluchevsky	Любавинское Lubavinsky	Бугдаинское Bugdainsky	Жирекенское Zhirkensky	Шахтаминское Shahtaminsky	Букукинское Bukukinsky	Антоновское Antonovogorsky	Новоширокинское Novoshirokinsky	Нойон-Тологойское Noyon-Tologoyksky	Шерловогорское Sherlovogorsky	Халч-рангинское Khaltaranginsky
n	12	15	5	4	3	7	5	7	5	4	5	5	5	5	4
As	38,67 58,7	4329,0 6591,0	238,0 194,0	95,0 35,5	877	5192 1395	–	3,6 603,0	73	37 300	34300	1044	38590	60500	222,5
Cu	12947,0 114,2	1351,0 40,5	–	282,0 345,5	320	–	15,0 21,0	6,3 12931	89,7	–	348	16668	7500	9250	6266,0
Ag	19 2,82	15,9 2,0	– 1	6,4 4,5	–	–	–	–	–	1,5 6,0	7,2	142	192	1595	–
Bi	45,3 96,3	471,0 40,4	–	–	60	–	–	–	28,7	–	–	226	7	–	–
Sb	125,5 74,3	822,0 104,0	53,0 9,0	2,1 –	–	15,5 10,0	15,1 3,6	– 118,5	159,0	–	3,25	2974	8127	2118	44
Pb	98,3 80,3	8958,0 281,0	169,5 47,0	4,0 4,35	27	45,5 7,0	283,0 93,0	16,2 220,0	572,5	23,5 2000	141	85048	59200	51232	5127
ΣРЗЭ	69,24 198,5	135,8 127,2	61,1 166,4	127,3 91,6	15,35	39,5 51,3	17,3 33,9	4,0 43,3	113,3	255,3 44,7	30,3	15,62	68,1	112,4	35,5
Eu/Sm	0,16 0,24	0,15 0,22	0,18 0,36	0,16 0,26	–	0,17 0,65	0,19 0,30	0,14 0,53	0,1	0,11 0,26	0,34	0,86	0,17	0,07	0,63
Nb/La	0,26 0,14	0,21 0,20	0,32 0,17	0,13 0,55	–	0,47 0,45	0,73 0,80	1,5 –	–	0,47 2,32	104,0	1,43	0,38	–	4,25
Co/Ni	1,50 1,15	1,68 1,58	1,32 0,77	8,8 3,57	1,51	–	4,4 5,1	–	–	–	–	–	–	–	–
Rb/Sr	0,52 0,62	4,31 4,23	0,04 0,23	0,05 0,34	0,01	0,78 3,18	5,4 3,0	0,62 0,25	2,21	13,6 2,1	10,0	20,4	0,83	–	0,29
U/Th	0,15 0,45	0,15 0,48	–	– 2,23	–	0,62 0,85	0,56 0,56	0,27 1,74	0,25	0,63 0,70	0,1	0,33	–	–	–
Y/Ho	18,4 28,8	21,7 24,9	– 27,9	30,3 32,3	–	– 31,6	21,0 23,4	4,0 –	–	– 14,5	18,7	–	34,1	26,7	–
Zr/Hf	19,0 32,0	30,3 27,0	–	15,6 51,9	–	–	–	–	–	64,5 –	–	31,2	–	5,0	–
≅ Eu*	0,96 0,93	0,42 0,76	– 1,14	0,52 0,80	–	0,62 0,85	0,73 1,11	0,92 0,67	0,47	0,40 0,72	0,76	1,07	0,64	0,07	0,21
≅ Ce*	1,10 1,00	0,88 0,94	0,89 1,0	1,09 0,97	–	1,09 1,09	0,96 0,90	0,72 0,99	1,09	1,14 1,25	0,86	0,98	1,15	0,99	0,97

В числителе – руды, образованные из магматических очагов верхней континентальной коры, в знаменателе – руды, образованные из магматических очагов нижней континентальной коры; n – число образцов. – – нет данных. $\cong Eu^* = (Eu_n / (Eu_n / Sm_n \times Gd_n)^{1/2})$; $\cong Ce^* = (2La_n + Sm_n) / 3$.

In the numerator – ores formed from the magmatic foci of the upper continental crust, in the denominator – ores formed from the magmatic foci of the lower continental crust; n – the number of samples. – – no data. $\cong Eu^* = (Eu_n / (Eu_n / Sm_n \times Gd_n)^{1/2})$; $\cong Ce^* = (2La_n + Sm_n) / 3$.

молибденовых и полиметаллических месторождений в большей мере были образованы из рудоносных флюидов верхней континентальной коры.

Обсуждение результатов исследований

В результате исследований получены новые данные о распределении химических элементов в рудоносных флюидах разнотипных месторождений Восточного Забайкалья. Их образование связано с процессами мантийно-корового взаимодействия в средне-позднеюрский период в результате коллизионных процессов при движении флюидных потоков в низы литосферы, с образованием

разноуровневых магматических очагов. Как правило, рудоносные флюиды нижней континентальной коры в сравнении с рудоносными флюидами верхней континентальной коры характеризуются незначительной степенью дифференциации, разными концентрациями рудных и РЗЭ, нейтральными и восстановительными обстановками образования.

Заключение

Анализ соотношений индикаторных элементов показывает, что источниками рудоносных флюидов в золоторудных, молибденовых месторождениях и в части месторождений цветных металлов

были разноглубинные, в разной степени дифференцированные рудоносные магмы (рис. 2). Имеющиеся данные свидетельствуют, что руды рассматриваемых золоторудных, и части молибденовых и вольфрамовых месторождений, образованы из рудоносных флюидов, функционировавших как в верхней, так и в нижней континентальной коре.

Полиметаллические и часть молибденовых и вольфрамовых месторождений имели только один магматический источник, действовавший в верхней или нижней континентальной коре (рис. 2).

Работа выполнена за счет средств госзадания (проект IX.137.1.2 № госрегистрации АААА-А17-117011210077-2) и РФФИ (грант 16-05-00353).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геодинамика западной части Монголо-Охотского пояса и тектоническая позиция рудных проявлений золота в Забайкалье / Ю.А. Зорин, В.Г. Беличенко, И.Г. Рутштейн, Л.Д. Зорина // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39. – № 11. – С. 104–112.
2. Спиридонов А.М., Зорина Н.А., Китаев Н.А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2006. – 291 с.
3. Козлов В.Д. Геолого-геохимическая очаговая структура и металлогения рудно-магматических систем Восточного Забайкалья // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46. – № 5. – С. 486–503.
4. Смирнов С.С. Схема металлогении Восточного Забайкалья // Проблемы советской геологии. – 1936. – Вып. 6. – № 10. – С. 846–864.
5. Хомич И.Г., Борискина Н.Г. Совершенствование минерагенического районирования Восточного Забайкалья на основе геофизических исследований // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 7. – С. 1029–1046.
6. Goldfarb R.J., Santosh M. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: are they unique? // Geosci. Front. – 2014. – V. 5. – P. 139–153.
7. Juvenile vs. recycled crust in NE China: Zircon U–Pb geochronology, Hf isotope and an integrated model for Mesozoic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula / Q. Yang, M. Santosh, J. Shen, Sh. Li // Gondwana Res. – 2014. – V. 25. – P. 1445–1468.
8. Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. Geodynamic framework of large unique uranium ore belts in Southeast Russia and East Mongolia // Journal of Asian Earth Sciences. – 2016. – V. 119. – P. 145–166.
9. Zhao D., Yamamoto Y., Yanada T. Global mantle heterogeneity and influence on teleseismic regional tomography // Gondwana Research. – 2013. – V. 23. – № 2. – P. 595–616.
10. Maruyama S., Santosh M., Zhao D. Superplume, supercontinent, and post-perovskite: Mantle dynamics and antiplate tectonics on the Core-Mantle Boundary // Gondwana Research. – 2007. – V. 11. – P. 7–37.
11. Li Sh.-R., Santosh M. Metallogeny and craton destruction: Records from the North China Craton // Ore Geology Reviews. – 2014. – V. 56. – P. 376–414.
12. Ridley J.R., Diamond L.W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models // Reviews in Economic Geology. – 2000. – V. 13. – P. 141–162.
13. Li C., Van der Hilst R.D. Structure of the upper mantle and transition zone beneath Southeast Asia from travel time tomography // Journal of Geophysical Research. – 2010. – V. 115. – B07308.
14. Абрамов Б.Н., Калинин Ю.А., Посохов В.Ф. Любавинское золоторудное месторождение (Восточное Забайкалье): петрогеохимия, источники пород и руд // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 134–144.
15. Абрамов Б.Н. Верхне-Алиинское золоторудное месторождение: условия формирования, петрогеохимические особенности пород и руд (Мунгинский рудный узел, Восточное Забайкалье) // Литосфера. – 2016. – № 4. – С. 92–101.
16. Криволуцкая Н.А. Парагенетические ассоциации минералов и условия образования руд Ключевского золоторудного месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. – 1996. – Т. 38. – № 4. – С. 344–361.
17. Высокопродуктивные этапы базитового и гранитоидного магматизма Северной Азии, оценка их ресурсного потенциала, научное обоснование критериев прогноза и поисков крупных Cu–Ni–Pt, Co, Au, Ag и редкометалльных месторождений / А.С. Борисенко, А.М. Спиридонов, А.Э. Изох, А.В. Прокопьев, В.И. Лебедев, И.В. Гасков, Л.Д. Зорина, А.В. Костин, Е.А. Наумов, И.Г. Третьякова // Вестник отделения наук о Земле РАН. – 2012. – С. 237–252.
18. Шахтаминская мо-порфировая рудно-магматическая система (Восточное Забайкалье): возраст, генетические особенности / А.П. Берзина, А.Н. Берзина, В.О. Гимон, З.Ш. Крымский, А.Н. Ларионов, И.В. Николаева, П.А. Серов // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 6. – С. 764–786.
19. Коваленко В.А., Кисилева Г.Д., Крылова Т.Л. Минералогия и условия формирования руд золотоносного W-Мо-порфирового Бугдаинского месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 52. – № 2. – С. 107–142.
20. Жирекенская мо-порфировая рудно-магматическая система (Восточное Забайкалье): U–Pb возраст, источники, геодинамическая обстановка / А.П. Берзина, А.Н. Берзина, В.О. Гимон, Т.Б. Баянова, И.Ю. Кисилева, Р.Ш. Крымский, Е.Н. Лепехина, С.В. Палеский // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 3. – С. 571–594.
21. Абрамов Б.Н. Нойон-Тологойское полиметаллическое месторождение: петрогеохимические особенности состава пород и руд // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 2. – С. 215–230.
22. Широкинский рудный узел (Восточное Забайкалье): условия образования, геохимия пород и руд, связь с магматизмом / Б.Н. Абрамов, Ю.А. Калинин, К.Р. Ковалев, В.Ф. Посохов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 6–17.
23. Геохимические особенности золотокварцевых жил в интрузиях гранитоидов и терригенных толщах Яно-Колымского складчатого пояса (Северо-Восток России) / А.В. Волков, А.А. Сидоров, Н.Е. Савва, Е.Е. Колова // Доклады Академии Наук. – 2016. – Т. 470. – № 1. – С. 77–82.
24. Абрамов Б.Н. Особенности распределения редкоземельных элементов в рудах молибденовых месторождений Восточного Забайкалья // Отечественная геология. 2018. – № 1. – С. 55–60.
25. Скублов С.Г. Геохимия редкоземельных элементов в породообразующих метаморфических минералах. – СПб.: Наука, 2005. – 147 с.
26. Сафонов Ю.Г., Горбунов Г.И., Пэк А.А., Волков А.В., Злобина Т.М., Кравченко Г.Г., Малиновский Е.П. Состояние и перспективы развития учения о структурах рудных полей и месторождений // Геология рудных месторождений. – 2007. – Т. 49. – № 5. – С. 386–420.
27. Гвоздев В.И. Рудно-магматические системы скарново-сеелит сульфидных месторождений Востока России: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Владивосток, 2007. – 54 с.

28. Семинский Ж.В. Эндогенно-рудные системы Юго-Восточной Сибири в инверсионном слое земной коры // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН. – 2015. – № 2 (51). – С. 5–18.
29. Менакер Г.И. К вопросу о глубинном строении Прибайкалья и Забайкалья // Геология и геофизика. – 1972. – № 5. – С. 93–96.
30. Винокуров С.Ф. Европиевые аномалии в рудных месторождениях и их геохимическое значение // Доклады академии наук. – 1996. – Т. 346. – № 6. – С. 792–795.
31. Jones B., Manning D.A.C. Composition of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones // Chemical Geology. – 1994. – V. 111. – P. 111–129.
32. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province / L. Kun, Y. Ruidong, C. Wenying, L. Rui, T. Ping // Chinese Journal of Geochemistry. – 2014. – V. 33. – P. 109–118.
33. Oreskes N., Einaudi M.T. Origin of rare-earth element enriched hematite breccias at the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, Roxby Downs, South Australia // Economic Geology. – 1990. – V. 85. – P. 1–28.
34. Baum M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho6 Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1996. – V. 123. – P. 323–333.
35. Bau M., Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-earth element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1995. – V. 119. – P. 213–223.
36. Bau M. Rare earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the europium // Chemical Geology. – 1991. – V. 93. – P. 219–230.
37. Monecke T., Kempe U., Gotze J. Genetic significance of the trace element in metamorphic and hydrothermal quartz: a reconnaissance study // Earth and Planetary Science Letters. – 2002. – V. 202. – P. 709–724.
38. Тейлор С.П., Мак-Леннон С.П. Континентальная кора: ее состав и эволюция. – М.: Мир, 1988. – 384 с.
39. Минеев Д.А. Лантаноиды в рудах редкоземельных и комплексных месторождений. – М.: Наука, 1974. – 237 с.

Поступила 20.11.2018 г.

Информация об авторах

Абрамов Б.Н., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии и рудогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН.

UDC 550.42 (571.55)

SOURCES OF ORE-BEARING FLUIDS Au, Mo, W AND Pb–Zn OF EASTERN TRANSBAIKALIA DEPOSITS (ACCORDING TO THE RARE EARTH ELEMENTS DISTRIBUTION)

Bair N. Abramov,
b_abramov@mail.ru

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS,
16A, Nedorezov street, Chita, 672014, Russia, PO box 1032.

The relevance of the work is in the fact that the presented data on the sources of ore-bearing fluids of different types of Mesozoic deposits of Eastern Transbaikalia, based on the analysis of distribution of rare-earth elements and indicator ratios of rare and rare-earth elements in ores, will provide new knowledge about the nature of ore formation.

The aim of the work is to determine the features of distribution of ore and rare-earth elements in ores of various types of deposits, formed due to different depth ore fluids.

Methods. To determine the elemental composition of rocks, the X-ray fluorescence method was used (GIN SB RAS, Ulan-Ude). The concentrations of rare-earth elements were determined by the method of sorption-atomic emission analysis with inductively coupled plasma (GIN SB RAS, Ulan-Ude).

Result. It was established that the sources of gold ores of Aleksandrovsky, Itakinsky, and Kariysky, Bugdainsky and Zhirekensky molybdenum, Bukuinsky tungsten deposits were not of uniform depths and differentiated to various extent ore-bearing magmatic sources. The presence of multiple sources of mineralization is confirmed by the indicator ratios Eu/Sm, U/Th, Hf/Sm and Nb/La. It was revealed that in gold deposits in ores formed from magmatic sources of the upper continental crust, relative to the ores, the sources of which were ore-bearing fluids of the lower continental crust, there are elevated concentrations of chalcophile elements (Cu, Ag, Bi, Sb, Pb) and lower concentrations of lanthanides. In molybdenum deposits in ores from magmatic sources of the lower continental crust, in comparison with the ores formed in the upper continental crust, there are elevated concentrations of both chalcophilic elements and lanthanides. In molybdenum deposits in ores from magmatic sources of the lower continental crust, in comparison with the ores formed in the upper continental crust, there are elevated levels of both chalcophile elements and lanthanides. In polymetallic deposits and parts of molybdenum and tungsten deposits, there was only one ore-bearing magmatic source operating in the upper or lower continental crust.

Key words:

Ore deposits, ore-bearing fluids, upper and lower continental crust, indicator relation of elements, rare-earth elements, Eastern Transbaikalia.

The research was carried out using the funds of State Task (project IX.137.1.2 state registration no. AAAA - A17-117011210077-2) and RFBR (grant 16-05-00353).

REFERENCES

- Zorin Yu.A., Belichenko V.G., Rutshtein I.G., Zorina L.D. Geodynamics of the western part of the Mongol-Okhotsk belt and the tectonic position of ore occurrences of gold in Transbaikalia. *Russian Geology and Geophysics*, 1998, vol. 39, no. 11, pp. 104–112. In Rus.
- Spiridonov A.M., Zorina L.D., Kitaev N.A. *Zolotonosnye rudno-magmaticheskie sistemy Zabaykalya* [Gold-Bearing ore-magmatic systems of Transbaikalia]. Novosibirsk, Academic publishing house Geo, 2006. 291 p.
- Kozlov V.D. Geologo-geochemical central structure and metalogeny of granite ore-magmatic systems in Eastern Transbaikalia. *Russian Geology and Geophysics*, 2005, vol. 46, no. 5, pp. 486–503. In Rus.
- Smirnov S.S. Skhema metallogenii Vostochnogo Zabaykalya [Metallogeny Scheme of Eastern Transbaikalia]. *Problems of Soviet Geology*, 1936, vol. 6, no. 10, pp. 846–864.
- Homich I.G., Boriskina N.G. Advancement of mineragenic regionalization of eastern Transbaikalia based on geophysical studies. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 7, pp. 1029–1046. In Rus.
- Goldfarb R.J., Santosh M. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: are they unique? *Geosci. Front.*, 2014, vol. 5, pp. 139–153.
- Yang Q., Santosh M., Shen J., Li Sh. Juvenile vs. recycled crust in NE China: Zircon U–Pb geochronology, Hf isotope and an integrated model for Mesozoic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula. *Gondwana Res.*, 2014, vol. 25, pp. 1445–1468.
- Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. Geodynamic framework of large unique uranium ore belts in Southeast Russia and East Mongolia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, vol. 119, pp. 145–166.
- Zhao D., Yamamoto Y., Yanada T. Global mantle heterogeneity and influence on teleseismic regional tomography. *Gondwana Research*, 2013, vol. 23, no. 2, pp. 595–616.
- Maruyama S., Santosh M., Zhao D. Superplume, supercontinent, and post-perovskite: Mantle dynamics and antiplate tectonics on the Core-Mantle Boundary. *Gondwana Research*, 2007, vol. 11, pp. 7–37.
- Li Sh.-R., Santosh M. Metallogeny and craton destruction: Records from the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 56, pp. 376–414.
- Ridley J.R., Diamond L.W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models. *Reviews in Economic Geology*, 2000, vol. 13, pp. 141–162.
- Li C., Van der Hilst R.D. Structure of the upper mantle and transition zone beneath Southeast Asia from travel time tomography. *Journal of Geophysical Research*, 2010, vol. 115, B07308.
- Abramov B.N., Kalinin Yu.A., Posohov V.F. Lubavinsky gold deposit (Eastern Transbaikalia): petrogeochemistry, sources of rocks and ore. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 134–144. In Rus.
- Abramov B.N. Verkhne-Aliinsky gold deposit: Conditions of formation, petrogeochemical features of rocks and ores (Munginsk ore cluster, Eastern Transbaikalia). *Lithosphere*, 2016, no. 4, pp. 92–101. In Rus.

16. Krivoluckaya N.A. Paragenetic associations of minerals and ore formation conditions of Klyuchevsky gold deposit (Eastern Transbaikalia, Russia). *Geology of ore deposits*, 1997, no. 4, pp. 344–361. In Rus.
17. Borisenko A.S., Spiridonov A.M., Izokh A.E., Prokopev A.V., Lebedev V.I., Gaskov I.V., Zorina L.D., Kostin A.V., Naumov E.A., Tretyakova I.G. Vysokoproduktivnye etapy bazitovogo i granitoidnogo magmatizma Severnoy Azii, otsenka ikh resurnogo potentsiala, nauchnoe obosnovanie kriteriev prognoza i poiskov krupnykh Cu-Ni-Pt, Co, Au, Ag i redkometallnykh mestorozhdeniy [Highly productive stages of basite and granitoid magmatism of Northern Asia, assessment of their resource potential, scientific substantiation of forecast criteria and searches for large Cu-Ni-Pt, Co, Au, Ag and rare-metal deposits]. *Bulletin of the Department of earth Sciences RAS*, 2012, pp. 237–252.
18. Berzina A.P., Berzina A.N., Gimon V.O., Nikolaeva I.V., Krymskii R.S., Larionov A.N., Serov P.A. The Shakhtama porphyry Mo ore-magmatic system (eastern Transbaikalia): Age, sources, and genetic features. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 6, pp. 587–605. In Rus.
19. Kovalenker V.A., Kiseleva G.D., Krylova T.L., Andreeva O.V. Mineralogy and ore formation conditions of the Bugdaya Au-Bearing W-Mo porphyry deposit, Eastern Transbaikalia Region, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2011, vol. 53, no. 2, pp. 93–125. In Rus.
20. Berzina A.P., Berzina A.N., Gimon 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. 56, no. 3, pp. 571–594. In Rus.
21. Abramov B.N. The Noion-Tologoi polymetallic deposit: Formation conditions and petrogeochemical peculiarities of rocks and ores (eastern Transbaikalia). *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 2, pp. 215–230. In Rus.
22. Abramov B.N., Kalinin Yu.A., Kovalev K.R., Posohov V.F. Shirokinsky ore cluster (Eastern Transbaikalia): formation conditions, petrochemistry of rocks and ores, association between mineralization and magmatism. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 6–17. In Rus.
23. Volkov A.V., Sidorov A.A., Murashov K.Y., Sidorova N.V., Savva N.E., Kolova E.E. Geochemical features of gold-quartz veins in granitoid intrusives and terrigenous masses of the Yana-Kolyma folded belt in the northeast of Russia. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 470, no. 1, pp. 933–937. In Rus.
24. Abramov B.N. Osobennosti raspredeleniya redkozemelnykh elementov v rudakh molibdenovykh mestorozhdeniy Vostochnogo Zabaykalya [Peculiarities of distribution of rare-earth elements in ores of molybdenum deposits in Eastern Transbaikalia]. *Domestic geology*, 2018, no. 1, pp. 55–60.
25. Skublov S.G. *Geokhimiya redkozemelnykh elementov v porodoobrazuyushchikh metamorficheskikh mineralakh* [Geochemistry of rare-earth elements in rock-forming metamorphic minerals]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2005. 147 p.
26. Safonov Yu.G., Gorbunov G.I., Pehk A.A., Volkov A.V., Zlobina T.M., Kravchenko G.G., Malinovskiy E.P. Structure of ore fields and deposits: Current status and outlook for further development. *Geology of Ore Deposits*, 2007, vol. 49, no. 6, pp. 386–420. In Rus.
27. Gvozdev V.I. *Rudno-magmaticheskie sistemy skarnovo-sheelit sulfidnykh mestorozhdeniy Vostoka Rossii*. Avtoreferat Diss. Dokt. nauk [Ore-magmatic systems of skarn-scheelite of sulfide deposits of Eastern Russia. Dr. Diss. Abstract]. Vladivostok, 2007. 54 p.
28. Seminsky Zh.V. Endogenno-rudnye sistemy Yugo-Vostochnoy Sibiri v inversionnom sloe zemnoy kory [Endogenous ore systems of South-Eastern Siberia in the inversion layer of the earth's crust]. *News of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences*, 2015, no. 2 (51), pp. 5–18.
29. Menaker G.I. K voprosu o glubinnom stroenii Pribaykalya i Zabaykalya [On the issue of the deep structure of the Baikal and Transbaikalia]. *Russian Geology and Geophysics*, 1972, no. 5, pp. 93–96.
30. Vinokurov S.F. Europium anomalies in the ore deposits and their geochemical significance. *Doklady Earth Sciences*, 1996, vol. 346, no. 1, pp. 792–795. In Rus.
31. Jones B., Manning D.A.C. Composition of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 1994, vol. 111, pp. 111–129.
32. Kun L., Ruidong Y., Wenyong C., Rui L., Ping T. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2014, vol. 33, pp. 109–118.
33. Oreskes N., Einaudi M.T. Origin of rare-earth element enriched hematite breccias at the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, Roxby Downs, South Australia. *Economic Geology*, 1990, vol. 85, pp. 1–28.
34. Baum M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Hob Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1996, vol. 123, pp. 323–333.
35. Bau M., Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-earth element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1995, vol. 119, pp. 213–223.
36. Bau M. Rare earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the europium. *Chemical Geology*, 1991, vol. 93, pp. 219–230.
37. Monecke T., Kempe U., Gotze J. Genetic significance of the trace element in metamorphic and hydrothermal quartz: a reconnaissance study. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, vol. 202, pp. 709–724.
38. Teylor S.P., Mak-Lennon S.P. *Kontinentalnaya kora: ee sostav i evolyutsiya* [Continental crust: its composition and evolution]. Moscow, Mir Publ., 1988. 384 p.
39. Mineev D.A. *Lantanoidy v rudakh redkozemelnykh i kompleksnykh mestorozhdeniy* [Lanthanides in ores of rare-earth and complex deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 237 p.

Received: 20 November 2018.

Information about the authors

Bair N. Abramov, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS.

УДК 553.461:549.2,5

АКЦЕССОРНЫЕ САМОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ И ИХ ОКСИДЫ ИЗ МАССИВНЫХ ХРОМИТИТОВ КЕМПИРСАЙСКОГО УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА (ЮЖНЫЙ УРАЛ, КАЗАХСТАН)

Юричев Алексей Николаевич,

juratur@sibmail.com

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

Актуальность исследования обусловлена недостаточной всесторонней изученностью минералогических аспектов ультрамафитовых реститовых массивов, что не дает возможности их обобщения на минералогическом уровне и восстановления полной истории их формирования и преобразования, а также решения целого ряда спорных вопросов петрологии данных объектов. Минералогия самородных металлов и их оксидов из реститовых ультрамафитов является крайне слабо изученным направлением.

Цель: изучение минерализации самородных металлов и их оксидов в густокрапленных и сливных хромититах Кемпирсайского ультрамафитового массива, реконструкция механизма ее формирования.

Методы: изучение рудной минерализации в аншлифах с использованием поляризационного микроскопа AxioScope Carl Zeiss; диагностика химического состава рудной минерализации методом рентгеноспектрального микроанализа с применением электронного сканирующего микроскопа Tescan Vega II LMU, оборудованного энергодисперсионным спектрометром (с полупроводниковым Si (Li) детектором INCA x-sight) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700.

Результаты. Впервые в хромититах Кемпирсайского массива выполнена детальная диагностика акцессорной минерализации самородных металлов и их оксидов, по результатам которой выявлены и охарактеризованы: самородный никель, самородное серебро, самородная медь, самородное железо, аварунит, касситерит, монтепонит, цинкит. Концентрирование рассмотренной минерализации, очевидно, было связано с ее мобилизацией в процессе серпентинизации и преобразования первичных силикатов, а также хромшпинелидов и сульфидов при восстановительных условиях. Образование металлов автор связывает с тенденцией Ni и подчиненного Fe высвобождаться из кремнекислородных связей первичного оливина, а Cu и Zn – из связей сульфидов и хромшпинелидов и переходить в форму свободных элементов. Очевидно, привнос части элементов (Cd, Sn) осуществлялся и самими серпентинизирующими растворами. Дальнейшая судьба данных металлов определялась их концентрированием и последующим отложением из высоконасыщенных надкритических флюидов.

Ключевые слова:

Кемпирсайский массив, хромититы, самородные металлы, типоморфизм, химический состав, генезис.

Введение

Ультрамафитовые реститовые массивы преимущественно дунит-гарцбургитового состава являются составной частью мафит-ультрамафитовых поясов складчатых областей. В последние несколько десятилетий они привлекают все большее внимание исследователей как с позиции генезиса, учитывая их мантийную природу образования и связь с ранними этапами развития складчатых сооружений, так и с позиции рудоносности – своей промышленной хромитовоспособностью с включением минералов ЭПГ, асбестовоспособностью и никеленосностью гипергенной природы (коры выветривания).

Из рудной минерализации, отмечаемой в реститовых ультрамафитах (собственно дунит-гарцбургитовый субстрат и хромититы, без учета зон гипергенеза), только минералогия шпинелидов и минералов ЭПГ является в настоящее время наиболее хорошо изученным разделом [1–13], другие рудные минералы, в частности самородные металлы и их оксиды – в литературе освещены значительно слабее.

Спорность многих аспектов петрологии реститовых ультрамафитов обусловлена недостаточной всесторонней изученностью данных массивов на минералогическом уровне. Известно, что одним из главных носителей генетической информации в первую очередь является минерал, а не порода. Изучив в достаточной степени минералогию

объекта, можно восстановить историю его образования и преобразования.

Трудности в диагностике самородных металлов и их природных сплавов связаны с их крайне малыми размерами (до 50 мкм), а также с их очень незначительным содержанием в породах. С помощью рентгеноспектрального микроанализа [14] выполнено комплексное изучение акцессорной минерализации самородных металлов и их оксидов в образцах массивных хромититов, отобранных в карьере «Объединенный» крупнейшего в мире «Алмаз-Жемчужина» хромитового месторождения Кемпирсайского ультрамафитового массива. В работе приведена химическая типизация минералов, а также сделано предположение об условиях и механизме их формирования.

Краткая геологическая характеристика исследуемого объекта

Кемпирсайский массив является крупнейшим массивом ультрамафитов на юге Урала и хорошо известен благодаря своим уникальным по размеру месторождениям хромитов. Он сложен метаморфическими (тектонизированными) ультрамафитами офиолитовой ассоциации, располагающимися в крупном Сакмарском аллохтоне, представляющем собой реликт океанической коры раннепалеозойского возраста, шарьированный в позднем палеозое на восточную окраину Восточно-Европей-

ского палеоконтинента при закрытии Уральского палеоокеана [15–17].

На современном эрозионном срезе Кемпирсайский массив имеет грушевидную вытянутую форму, резко расширяющуюся с севера на юг от 0,6 до 31,6 км. Его общая площадь составляет более 900 км², контакты массива с вмещающими породами девона, ордовика и докембрия тектонические (рис. 1).

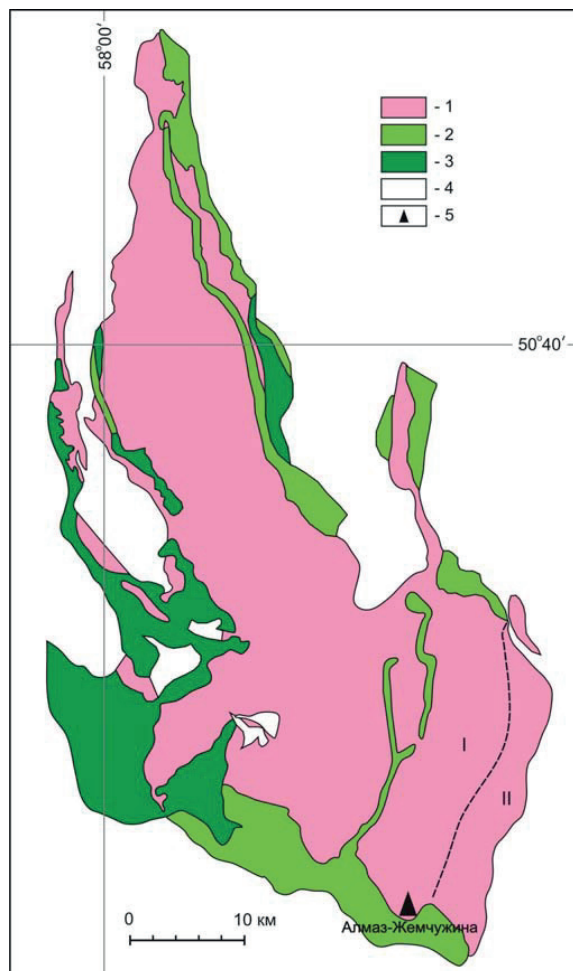


Рис. 1. Схематизированная геологическая карта Кемпирсайского ультрамафитового массива (по Н.В. Павлову, И.И. Григорьевой [18], с корректировками автора): 1 – дунит-гарцбургит-лерцолитовая серия пород; 2 – клинопироксенит-габбровые комплексы; 3 – оливиновые и рогово-обманковые габбро, троктолиты и параллельные диабазовые дайки; 4 – вмещающие вулканогенно-осадочные породы (PR–D); 5 – местоположение исследуемого «Алмаз-Жемчужина» хромитового месторождения в структуре Кемпирсайского массива. Субмеридиональные зоны Главного (Южно-Кемпирсайского) рудного поля: I – Западная, II – Восточная

Fig. 1. Schematic geological map of Kempirsai ultramafic massif (by N.V. Pavlov, I.I. Grigoryeva [18], with corrections by author): 1 – dunit-harzburgite-herzolite series of rocks; 2 – clinopyroxenite-gabbro complexes; 3 – olivine and hornblende gabbro, troctolites and parallel diabasic dikes; 4 – enclosing volcanic-sedimentary rocks (PR–D); 5 – location of studied «Almaz-Zhemchuzhina» chromite deposit in structure of Kempirsai massif. Submeridional zones of the Main (South Kempirsai) ore field: I – Western, II – Eastern

В северной и центральной части массив сложен в основном гарцбургитами, энстатитовыми дунитами с подчиненным количеством плагиодунитов, пироксенитов, верлитов и плагиоверлитов, по периферии распространены габброиды (габбро, габбро-нориты и оливиновое габбро); в южной и юго-восточной части выделяются две субмеридиональные зоны (западная и восточная), сложенные крупными телами массивных дунитов, залегающих среди пород шлирово-полосчатого комплекса, энстатитовых дунитов и гарцбургитов с подчиненным количеством верлитов и лерцолитов [18]. В пределах этих двух зон расположены основные хромитовые месторождения, образующие Главное рудное поле.

Хромитовые месторождения обычно состоят из серии сближенных линзовидных и реже жилкообразных рудных тел, размеры которых варьируют по протяженности от первых десятков метров до ~1,5 км, при мощностях от первых метров до ~150 м. Они образованы преимущественно массивными хромититами, состоящими на 90...95 % из грубо-, крупнозернистого агрегата зерен хромшпинелидов и небольшого количества карбонатов и вторичных силикатов (серпентина, киммерита, уваровита и др.) в интерстициях этих зерен. В периферийных частях рудных тел помимо массивного текстурного типа распространены также нодулярные и густовкрапленные руды, которые быстро выклиниваются по мере удаления от рудного тела [18].

В настоящее время на балансе Кемпирсайского массива числится 427 млн т разведанных запасов хрома [19]. При этом более половины всех балансовых запасов и около 70 % добычи приходится на крупнейшие месторождения «Алмаз-Жемчужина» и «Миллионное».

Акцессорная минерализация самородных металлов и их оксидов

При изучении вещественного состава хромшпинелидов и акцессорных сульфидов в густовкрапленных и сливных хромититах (рис. 2), отобранных в карьере «Объединенный» «Алмаз-Жемчужина» хромитового месторождения Кемпирсайского ультрамафитового массива, автором было диагностированы единичные мелкие (до 0,04 мм) проявления самородных металлов и их оксидов. Полученные результаты позволили подтвердить в составе хромититов наличие самородной меди, самородного железа и аварунита (FeNi₃), которые были отмечены при более ранних исследованиях, но не были подробно охарактеризованы [2, 20], а также впервые выявить и описать в составе хромитовых руд самородный никель, самородное серебро, касситерит (SnO₂), монтепонит (CdO) и цинкит (ZnO) (рис. 3).

Самородный никель отмечается в виде одиночных округлых каплевидных выделений с коррозированными краями в интерстициях зерен хромшпинелидов (рис. 3, а). Размеры таких выделений

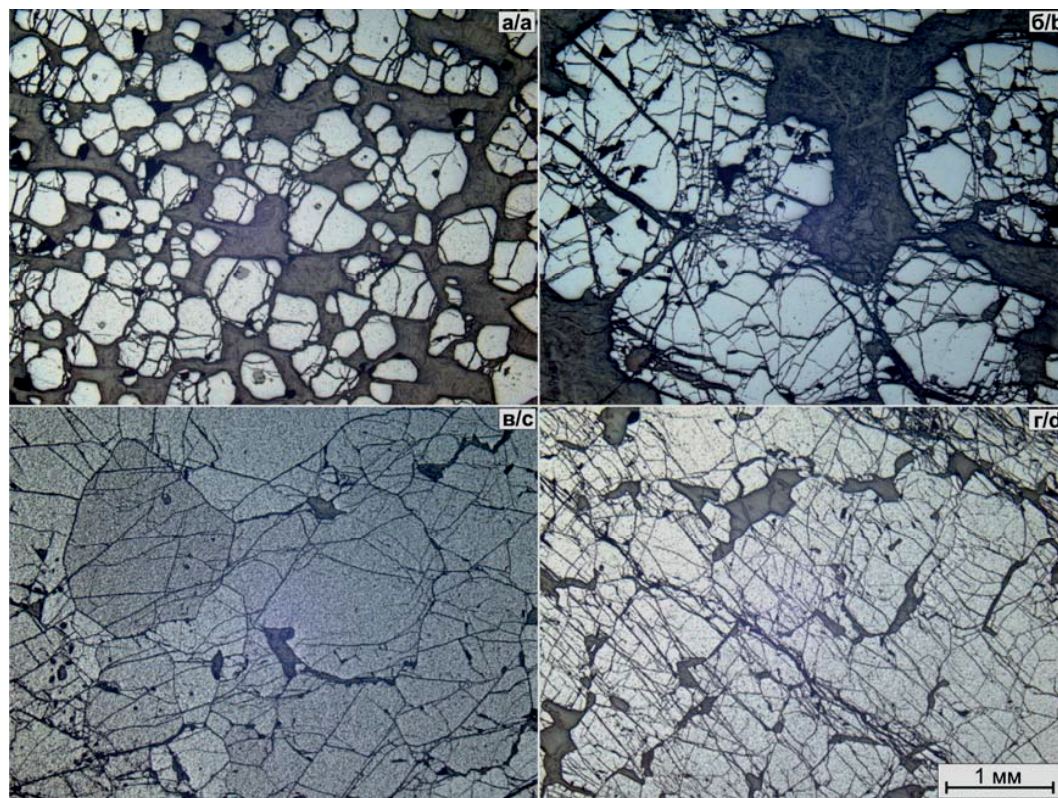


Рис. 2. Густовкрапленные (а, б) и сливные (в, г) хромититы «Алмаз-Жемчужина» хромитового месторождения Кемпирсайского ультрамафитового массива (микрофотографии шлифов в отраженном свете)

Fig. 2. Densely disseminated (a, b) and massive (c, d) chromitites of «Almaz-Zhemchuzhina» chromite deposit of Kemptirсай ultramafic massif (photomicrographs polished sections in reflected light)

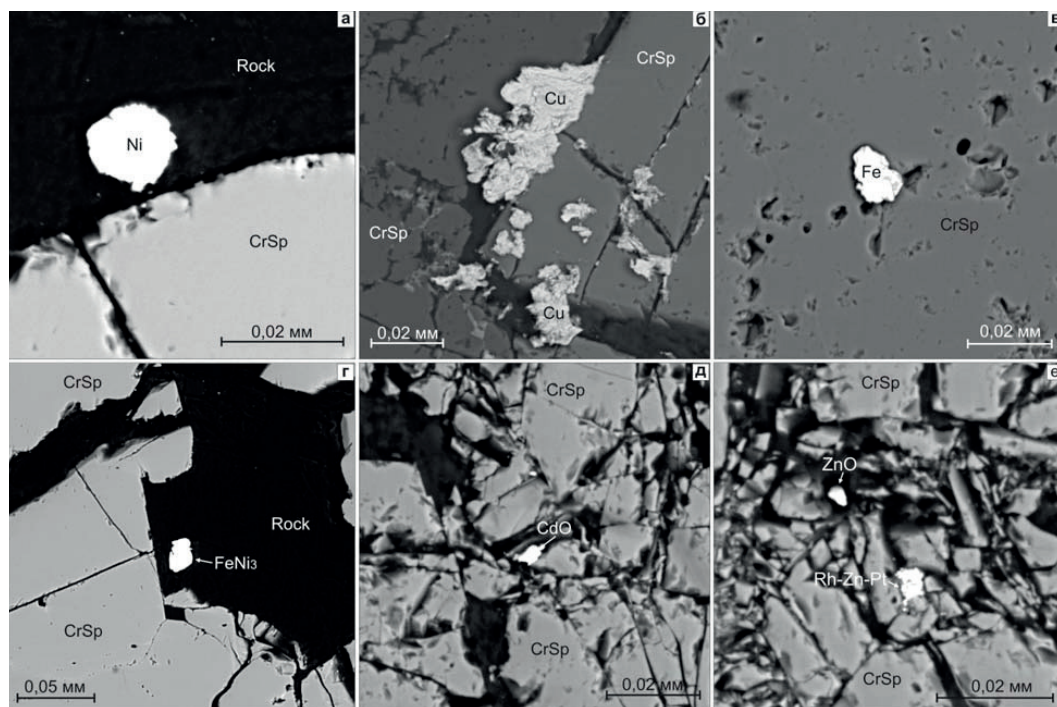


Рис. 3. Минерализация самородных металлов и их оксидов в хромититах Кемпирсайского ультрамафитового массива (снимки в режиме BSE): CrSp – хромипинелид; Rock – хлорит-серпентиновый агрегат

Fig. 3. Mineralization of native metals and their oxides in chromitites of Kemptirсай ultramafic massif (images in BSE mode): CrSp – chromopinelide; Rock – chlorite-serpentine aggregate

не превышаю 0,02 мм. В химическом составе минерала постоянно обнаруживается примесь Fe (до 11 %) и Cu (до 5 %) (рис. 4, таблица).

Самородное серебро – большая редкость для ультраосновных пород. К настоящему времени из-

вестно всего несколько сообщений о находках серебра в реститовых ультрамафитах Урала: в серпентинитах Кемпирсайского массива (Южный Урал) [20] и в сульфидном концентрате хромитовой руды массива Рай-Из (Полярный Урал) [5, 21]. При этом

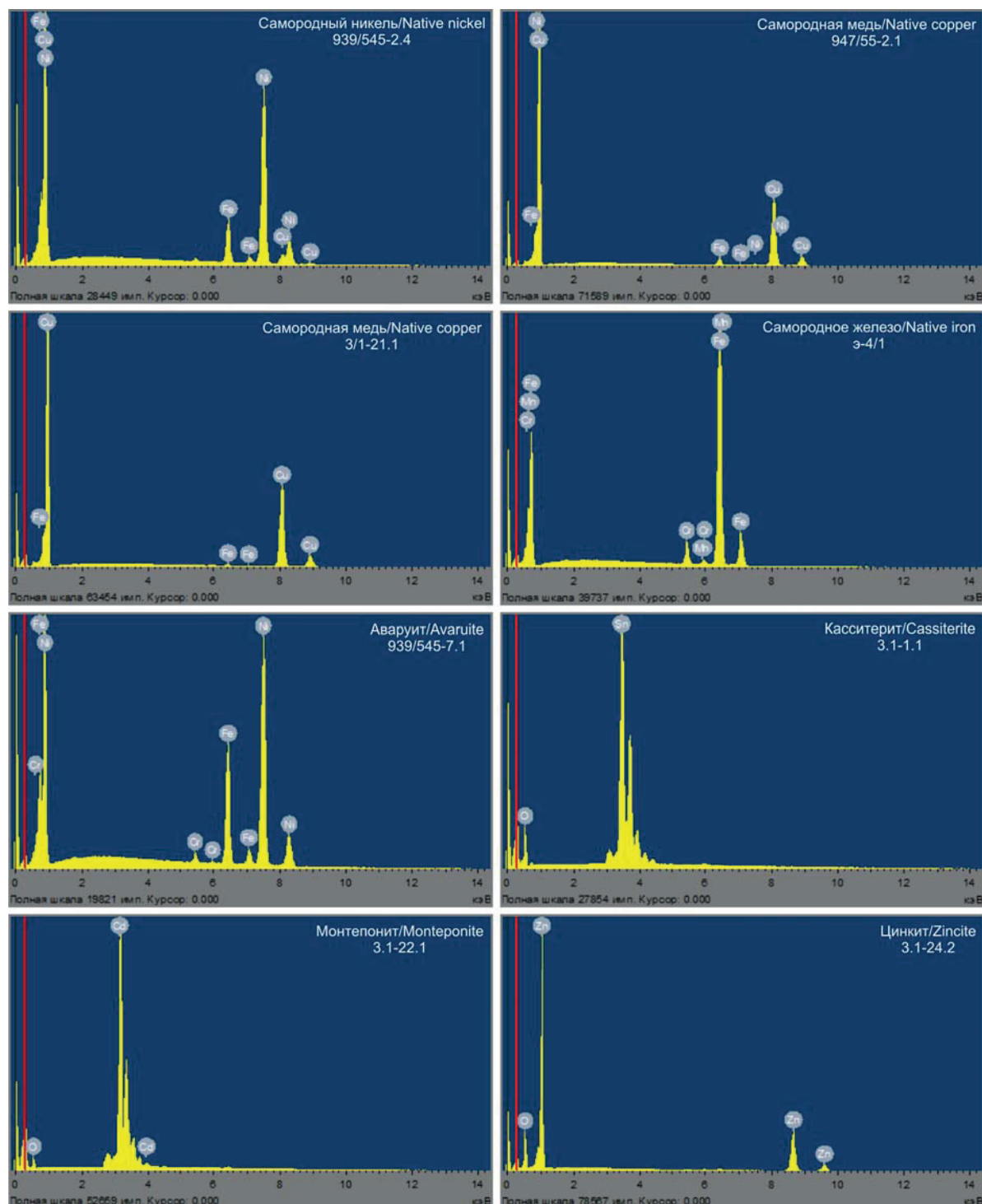


Рис. 4. Диаграммы химических составов самородных металлов и их оксидов из массивных хромититов Кемпирсайского ультрамафитового массива, полученные на электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega II LMU» с системой рентгеноспектрального микроанализа Oxford INCA Energy 350

Fig. 4. Diagrams of chemical compositions of native metals and their oxides from massive chromitites of Kempirsai ultramafic massif, obtained on electronic scanning microscope «Tescan Vega II LMU» with the X-ray spectral analysis system Oxford INCA Energy 350

Таблица. Химический состав самородных металлов и их оксидов в хромититах Кемпирсайского ультрамафитового массива, вес. %
Table. Chemical composition of native metals and their oxides in chromitites of Kempirsai ultramafic massif, wt. %

Минерал/Mineral	Образец/Sample	Ni	Cu	Fe	Mn	Zn	Sn	Cd	Cr	O	Сумма/Sum
Самородный никель/Native nickel	939/545-2.1	82,96	4,57	10,89	–	–	–	–	–	–	98,42
	939/545-2.4	83,67	4,83	10,86	–	–	–	–	–	–	99,36
Самородная медь/Native copper	947/55-2.1	1,00	94,30	3,36	–	–	–	–	–	–	98,66
	3/1-21.1	–	98,67	0,45	–	–	–	–	–	–	99,12
Самородное железо/Native iron	а-4/1	–	–	94,66	0,55	–	–	–	4,80	–	100,01
	а-4/2	–	–	95,12	0,47	–	–	–	4,02	–	99,61
Аваруит/Avaruite	939/545-5.1	73,42	–	24,74	–	–	–	–	1,63	–	99,79
	939/545-5.2	74,35	–	24,17	–	–	–	–	1,39	–	99,90
	939/545-7.1	74,88	–	23,69	–	–	–	–	1,43	–	100,00
	939/545-7.2	74,86	–	23,53	–	–	–	–	1,61	–	100,00
Касситерит/Cassiterite	3/1-1.1	–	–	–	–	–	74,71	–	–	25,12	99,83
	3/1-1.2	–	–	–	–	–	75,82	–	–	23,96	99,78
Монтепонит/Monteponite	3/1-22.1	–	–	–	–	–	–	86,16	–	13,85	100,01
Цинкит/Zincite	3/1-24.2	–	–	–	–	80,00	–	–	–	19,55	99,55

Примечание. Анализы выполнены на электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega II LMU», оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск), оператор Е.В. Корбояк. Измерения проводились на вольфрамовом катоде при ускоряющем напряжении 20 кВ (ток 5 нА, время набора 120 сек) и диаметре зонда 1...2 мкм. В качестве эталонов сравнения применялись стандарты МАС (55 standard Universal Block Layout + F/Cup № 6835). Для исследования использованы образцы хромититов из коллекции профессора Томского государственного университета А.И. Чернышова.

Note. The analyzes were performed on scanning electron microscope Tescan Vega II LMU, equipped with energy-dispersive spectrometry (with a semiconductor Si (Li) detector INCA x-sight) INCA Energy 350 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700 at the Analytical Center for Geochemistry of Natural Systems of Tomsk State University (Tomsk), operator is E.V. Korbovyak. The measurements were carried out on tungsten cathode at accelerating voltage of 20 kV (current 5 nA, dialing time 120 s) and probe diameter 1...2 μm. As standards of comparison, the standards of MAS (55 standard Universal Block Layout + F/Cup № 6835) were used. For the study, chromitite samples from collection of professor of Tomsk State University A.I. Chernyshov are used.

сведения о составе самородного серебра авторами сообщений, кроме А.Б. Макеева, не приводятся, видимо, из-за малых размеров обнаруженных ими выделений минерала.

Автором встречено единственное мелкое (~8...9 мкм) сгустковидное выделение серебра в хромитовом цементе сливного хромитита. Согласно проведенному анализу, главными изоморфными примесями химического состава выявленного самородного серебра являются цинк и хром: Ag=98,97 %, Zn=0,77 %, Cr=0,26 %. Нетипичная для серебра примесь хрома в химическом составе ранее отмечалась также А.Б. Макеевым в хромититах массива Рай-Из [5].

Самородная медь образует довольно крупные по отношению к другим самородным металлам (до 0,05 мм) выделения сноповидной, ветвистой и неправильной формы (рис. 3, б). Чаще встречается в виде изолированных образований, но отмечены срастания с халькопиритом, пентландитом и окисными минералами. В химическом составе самородной меди постоянно отмечается примесь Fe (до 3,5 %), реже – Ni (до 1,0 %) (рис. 4, таблица). Содержание данных элементов в ее химическом составе является типичным и ранее неоднократно отмечалось в самородной меди хромитовых руд Полярного Урала [5].

Самородное железо формирует изолированные сгустковидные, округлые или неправильные выделения размером до 0,02 мм непосредственно в зернах метаморфизованных хромшпинелидов (в хромитовом цементе) либо в серпентиновом субстрате

в интерстициях между ними (рис. 3, в). Более редкой является его ассоциация с вторичным магнетитом. В химическом составе самородного железа отмечается примесь Cr (до 4,8 %) и Mn (до 0,5 %) (рис. 4, таблица).

В качестве металлического твердого раствора Fe и Ni в интерстициях хромшпинелидов диагностированы нередкие округлые и неправильные проявления аваруита, размером до 0,04 мм (рис. 3, г). Химический состав выявленных аваруитов близок стехиометрическому, а также химическим составам данного минерала из ультрамафитового массива г. Солдатской (п-ов Камчатский мыс, Восточная Камчатка) [22] и океанических перидотитов Срединно-Океанического хребта (Атлантический океан) [23]. Однако отличается от последних постоянным присутствием в химическом составе Cr (до 1,7 %), который, очевидно, входит в состав минерала, «загрязняя» его, в виде тонкодисперсной механической примеси (рис. 4, таблица).

Оксиды Sn, Cd и Zn диагностированы в хромититах Кемпирсайского массива предположительно впервые (?). Они отмечены в виде редких мелких (до 0,005 мм) округлых или неправильных по форме обособлений, заполняющих пустотки и каверны внутри преимущественно трещиноватых, раздробленных зерен хромшпинелидов (рис. 3, д, е). Их химические составы характеризуются относительной «чистотой» (отсутствием примесей других компонентов) и несколько отклоняются от стехиометрических (рис. 4, таблица).

Автором зафиксировано, что цинкит постоянно отмечается вблизи выделений металлических твердых растворов ЭПГ с цветными металлами (системы Rh–Zn–Pt и Rh–Zn).

Выводы

Впервые в массивных хромититах Кемпирсайского ультрамафитового массива выполнена детальная диагностика акцессорной минерализации самородных металлов и их оксидов. Самородные медь и железо, а также аварунит отмечались в хромититах и при более ранних исследованиях [2, 20], но не были подробно охарактеризованы в связи с решением других научных и производственных задач. Впервые в хромититах массива обнаружены: самородный никель, самородное серебро, оксиды олова, кадмия и цинка.

В настоящее время актуальность исследования обуславливается выявлением ранее в составе аварунита примеси Ir (до 1,0 %), Pt (до 0,1 %) и Pd (до 0,2 %) [2], а также прослеживающейся маркерной ролью цинкита при обнаружении твердых раство-

ров ЭПГ с цветными металлами систем Rh–Zn–Pt и Rh–Zn.

Концентрирование рассмотренной минерализации, очевидно, связано с ее мобилизацией в процессе серпентинизации и преобразования первичных силикатов, прежде всего оливина, а также находящихся с ними в парагенезисе сульфидов и шпинелей при восстановительных условиях [20, 24, 25]. Образование металлов автор связывает с тенденцией Ni и подчиненного Fe высвобождаться из кремнекислородных связей первичного оливина, а Cu и Zn – из связей сульфидов и хромшпинелидов соответственно. Очевидно, что наряду с восстановлением самородных металлов из первичных силикатов, сульфидов или хромшпинелидов, возможен привнос части элементов (Cd, Sn) самими серпентинизирующими растворами.

Автор благодарит профессора Томского политехнического университета А.К. Мазурова за внимательную проработку статьи и ценные замечания и профессора Томского государственного университета В.П. Парначева за консультацию по вопросу геодинамической позиции Южного Урала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платиноиды хромитовых массивов Полярного Урала / Л.И. Гурская, Л.В. Смелова, Л.Р. Колбанцев, В.Д. Ляхницкая, Ю.С. Ляхницкий, С.Н. Шахова. – СПб.: Изд-во СПб картерфабрики ВСЕГЕИ, 2004. – 306 с.
2. Distler V.V., Kryachko V.V., Yudovskaya M.A. Formation conditions of platinum-group metals in chromite ores of the Kempirsai ore field // *Geology of Ore Deposits*. – 2003. – V. 45. – № 1. – P. 37–65.
3. Origin of platinum group minerals (PGM) inclusions in chromite deposits of the Urals / F. Zaccarini, G. Garuti, O. Thalhammer, E. Pushkarev // *Minerals*. – 2018. – V. 8. – № 9. – P. 1–21.
4. Геология, петрогеохимия и хромитовость габбро-гипербазитовых массивов Южного Урала / Д.Е. Савельев, В.И. Сначев, Е.Н. Савельева, Е.А. Бажин. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2008. – 320 с.
5. Макеев А.Б. Минералогия альпинотипных ультрабазитов Урала. – СПб.: Наука, 1992. – 197 с.
6. Юричев А.Н. Критерии регионального и локального прогнозирования потенциальной хромитовости подформных ультрамафитовых массивов складчатых областей // *Руды и металлы*. – 2016. – № 3. – С. 5–14.
7. Закономерности размещения и образования хромитовых месторождений / Л.И. Колотилов, С.М. Горяев, И.М. Крутилин, В.П. Прищепчик // Закономерности размещения и образования магнетитовых и хромитовых месторождений Мугоджар и Тургайского прогиба. – Алма-Ата: КазИМС, 1968. – С. 249–279.
8. Deformation-induced decomposition of enstatite in mantle peridotite and its role in partial melting and chromite ore formation / D.E. Saveliev, V.N. Puchkov, S.N. Sergeev, I.I. Musabirov // *Doklady Earth Sciences*. – 2017. – V. 476. – № 1. – P. 1058–1061.
9. Metamorphic evolution of sulphide-rich chromitites from the Chernichevo ultramafic massif, SE Bulgaria / J.M. González-Jiménez, F. Gervilla, A. Casado-González, V. Colás, T.N. Keresztess, I. Sergeeva, I. Fanlo // *Ore Geology Reviews*. – 2018. – V. 101. – P. 330–348.
10. Юричев А.Н., Чернышов А.И., Корбояк Е.В. Минералы платиновой группы из хромитов Кемпирсайского ультрамафитового массива (Мугоджары, Казахстан): новые данные // *Записки Российского минералогического общества*. – 2019. – Т. 148. – № 2. – С. 76–86.
11. Юричев А.Н. Рудные хромшпинелиды массивов Сыум-Кей и Харчерузский: химизм и генетическая природа, Полярный Урал // *Руды и металлы*. – 2017. – № 2. – С. 51–59.
12. Aswad K.J.A., Aziz N.R.H., Koyi H.A. Cr-spinel compositions in serpentinites and their implications for the petrotectonic history of the Zagros Suture Zone, Kurdistan Region, Iraq // *Geological magazine*. – 2011. – V. 148. – P. 802–818.
13. Testing the validity of chrome spinel chemistry as a provenance and petrogenetic indicator / M.R. Power, D. Pirrie, J.C. Andersen, P.D. Wheeler // *Geology*. – 2000. – V. 28. – P. 1027–1030.
14. Reed S.J.B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. – N.Y.: Cambridge University Press, 2005. – 189 p.
15. Мазуров А.К. Геодинамические обстановки формирования металлогенических комплексов Казахстана: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2003. – 43 с.
16. Fershtater G.B. Magmatism in the epochs of Ural paleocean closure and mobile belt development: composition, distinctive evolutionary features, and sources // *Petrology*. – 2013. – V. 21. – № 2. – P. 181–202.
17. История развития Уральского палеоокеана: сборник статей / Л.П. Зоненшайн, В.В. Матвеев. – М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР, 1984. – 164 с.
18. Павлов Н.В., Григорьева И.И. Месторождения хрома / Рудные месторождения СССР. Т. 1. – М.: Недра, 1978. – С. 172–224.
19. Справочник. Месторождения хрома, никеля, кобальта, ванадия Казахстана. 2-издание / Б.К. Нурабаев, А.А. Надырбаев, М.К. Тулегенов, Ж.Б. Тансыкбаева. – Алматы: РГП ПХВ «Информационно-аналитический центр геологии и минеральных ресурсов РК», 2015. – 258 с.
20. Смирнова Т.А. Теллурическое железо в ультраосновных породах Кемпирсайского плутона // *Записки Всесоюзного минералогического общества*. – 1970. – Ч. 99. – Вып. 6. – С. 745–748.
21. Строение, эволюция и минерогения гипербазитового массива Рай-Из / под ред. В.Н. Пучкова, Д.С. Штейнберга. – Свердловск: УрО АН СССР, 1990. – 228 с.
22. Пентландиты и аваруниты гипербазитового массива горы Солдатской (п-ов Камчатский мыс, Восточная Камчатка) /

- Р.М. Новаков, С.В. Москалева, В.В. Иванов, С.В. Паламарь // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. – 2014. – № 2. – С. 137–146.
23. Базылев Б.А. Развитие аваритсодержащей минеральной ассоциации в перидотитах из зоны разлома 15°20' (Атлантический океан) как одно из проявлений океанического метаморфизма // Российский журнал наук о Земле. – 2000. – Т. 2. – № 3–4. – С. 279–293.
24. Chashchukhin I.S., Votyakov S.L. Behavior of iron-group elements, oxybarometry, and genesis of unique chromite deposits in the Kempirsai massif // *Geology of Ore Deposits*. – 2009. – V. 51. – № 2. – P. 123–138.
25. Леснов Ф.П. Петрология полигенных мафит-ультрамафитовых массивов Восточно-Сахалинской офиолитовой ассоциации. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2015. – 240 с.
24. Chashchukhin I.S., Votyakov S.L. Behavior of iron-group elements, oxybarometry, and genesis of unique chromite deposits in

Поступила 26.04.2018 г.

Информация об авторах

Юричев А.Н., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры петрографии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 553.461:549.2,5

ACCESSORY NATIVE METALS AND THEIR OXIDES FROM MASSIVE CHROMITITES OF KEMPIRSAI ULTRAMAFIC MASSIF (SOUTH URAL, KAZAKHSTAN)

Alexey N. Yurichev,

juratur@sibmail.com

National Research Tomsk State University,
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the work is caused by weakly elaboration of mineralogical aspects of ultramafic restitic massifs, which does not allow their generalization at mineralogical level and restoration of complete history of their formation and transformation, as well as solution of number of controversial questions of petrology of these objects. The mineralogy of native metals and their oxides from restitic ultramafites is extremely poorly studied direction.

The main aim of the research is to study the mineralization of native metals and their oxides in densely disseminated and massive chromitites of Kempirsai ultramafic massif, reconstruction of mechanism of its formation.

The methods: study of ore mineralization in polished sections using a polarizing microscope AxioScope Carl Zeiss; determination of chemical composition of ore mineralization by the method of X-ray spectrum microanalysis using scanning electron microscope Tescan Vega II LMU, equipped with energy-dispersive spectrometry (with a semiconductor Si (Li) detector INCA x-sight) INCA Energy 450 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700.

The results. The authors have made an attempt to perform detailed diagnostics of accessory mineralization of native metals and their oxides in the chromitites of Kempirsai massif. According to the results native nickel, native silver, native copper, native iron, avaruite, cassiterite, monteponite and zincite were identified and characterized. Concentration of mineralization examined was apparently due to its mobilization in serpentinization and transformation of primary silicates, as well as chromospinelides and sulphides under reducing conditions. The author associates formation of metals with tendency of Ni and subordinate Fe to be liberated from the silicon-oxygen bonds of primary olivine, and Cu and Zn from bonds of sulfides and chromospinelides and transform into form of free elements. Obviously, introduction of a part of elements (Cd, Sn) was carried out by serpentinizing solutions themselves. The further fate of these metals was determined by their concentration and subsequent deposition from highly saturated supercritical fluids.

Key words:

Kempirsai massif, chromitites, native metals, typomorphism, chemical composition, genesis.

The author appreciates A.K. Mazurov, professor of Tomsk Polytechnic University, for detailed paper study and valuable commentaries and V.P. Parnachev, professors of Tomsk State University, for consultation on geodynamic position of Southern Ural.

REFERENCES

- Gurskaya L.I., Smelova L.V., Kolbantsev L.R., Lyakhnitskaya V.D., Lyakhnitskiy Yu.S., Shakhova S.N. *Platinoidy khromitonosnykh massivov Polyarnogo Urala* [Platinoids of the chromite-bearing massifs of the Polar Urals]. St-Petersburg, SPb kart-fabriki VSEGEI Publ., 2004. 306 p.
- Distler V.V., Kryachko V.V., Yudovskaya M.A. Formation conditions of platinum-group metals in chromite ores of the Kempirsai ore field. *Geology of Ore Deposits*, 2003, vol. 45, no. 1, pp. 37–65.
- Zaccarini F., Garuti G., Thallhammer O., Pushkarev E. Origin of platinum group minerals (PGM) inclusions in chromite deposits of the Urals. *Minerals*, 2018, vol. 8, no. 9, pp. 1–21.
- Saveliev D.E., Snachev V.I., Savelieva E.N., Bazhin E.A. *Geologiya, petrogeokhimiya i khromitonosnost' gabbro-giperbazitovykh massivov Yuzhnogo Urala* [Geology, petrogeochemistry and chromite-bearing of gabbro-hyperbasitic massifs of Southern Urals]. Ufa, DizaynPoligrafServis Publ., 2008. 320 p.
- Makeev A.B. *Mineralogiya alpinotipnykh ultrabazitov Urala* [Mineralogy of alpinotypic ultrabasites of the Urals]. St-Petersburg, Nauka Publ., 1992. 197 p.
- Yurichev A.N. Criteria of regional and local prediction of potential chromaticity of podiform ultramafic massifs of folded regions. *Rudy i metally*, 2016, no. 3, pp. 5–14. In Rus.
- Kolotilov L.I., Goryaev S.M., Krutinin I.M., Prishchepchik V.P. Zakonomernosti razmeshcheniya i obrazovaniya khromitovykh mestorozhdeniy [Regularities of location and formation of chromite deposits]. *Zakonomernosti razmeshcheniya i obrazovaniya magnetitovykh i khromitovykh mestorozhdeniy Mugodzhara i Turgayskogo progiba* [Regularities of location and formation of magnetite and chromite deposits of Mugodzhara and Turgai trough]. Alma-Ata, KazIMS Publ., 1968. pp. 249–279.
- Saveliev D.E., Puchkov V.N., Sergeev S.N., Musabirov I.I. Deformation-induced decomposition of enstatite in mantle peridotite and its role in partial melting and chromite ore formation. *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 476, no. 1, pp. 1058–1061.
- González-Jiménez J.M., Gervilla F., Casado-González A., Colás V., Kerestedjian T.N., Sergeeva I., Fanlo I. Metamorphic evolution of sulphide-rich chromitites from the Chernichevo ultramafic massif, SE Bulgaria. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 101, pp. 330–348.
- Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Korbovyak E.V. Platinum group minerals from chromitites of Kempirsai ultramafic massif (the South Urals): new data. *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 2019, vol. 148, no. 2, pp. 76–86. In Rus.
- Yurichev A.N. Ore chromospinelides of Syum-Keu and Harcheruzsky massifs: chemistry and genetic nature, the Polar Urals. *Rudy i metally*, 2017, no. 2, pp. 51–59. In Rus.
- Aswad K.J.A., Aziz N.R.H., Koyi H.A. Cr-spinel compositions in serpentinites and their implications for the petrotectonic history of the Zagros Suture Zone, Kurdistan Region, Iraq. *Geological Magazine*, 2011, vol. 148, pp. 802–818.
- Power M.R., Pirrie D., Andersen J.C., Wheeler P.D. Testing the validity of chrome spinel chemistry as a provenance and petrogenetic indicator. *Geology*, 2000, vol. 28, pp. 1027–1030.
- Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. N.Y., Cambridge University Press, 2005. 189 p.

15. Mazurov A.K. *Geodinamicheskie obstanovki formirovaniya metallogenicheskikh kompleksov Kazakhstana*. Avtoreferat Diss. Dokt. nauk [Geodynamic conditions of formation of metallogenic complexes of Kazakhstan. Dr. Diss. Abstract]. Tomsk, 2003. 43 p.
16. Fershtater G.B. Magmatism in the epochs of ural paleocean closure and mobile belt development: composition, distinctive evolutionary features, and sources. *Petrology*, 2013, vol. 21, no. 2, pp. 181–202.
17. *Istoriya razvitiya Uralskogo paleookeana: Sbornik statey* [History of development of Ural paleocean: Collection of articles]. Moscow, Institut okeanologii im. P.P. Shirshova AN SSSR Publ., 1984. 164 p.
18. Pavlov N.V., Grigoreva I.I. Mestorozhdeniya khroma [Chromium deposits]. *Rudnye mestorozhdeniya SSSR* [Ore deposits of the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1978. Vol. 1, pp. 172–224.
19. Nurabaev B.K., Nadyrbaev A.A., Tulegenov M.K., Tansykbaeva Zh.B. *Spravochnik. Mestorozhdeniya khroma, nikelya, kobalta, vanadiya Kazakhstana* [Directory. Deposits of chromium, nickel, cobalt, vanadium of Kazakhstan] Almaty, RGP PKHV «Informatsionno-analiticheskiy tsentr geologii i mineralnykh resursov RK» Publ., 2015. 258 p.
20. Smirnova T.A. Telluricheskoe zhelezo v ultraosnovnykh porodakh Kempirsayskogo plutona [Telluric iron in ultramafic rocks of Kempirsai pluton]. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*, 1970, vol. 99, no. 6, pp. 745–748.
21. *Stroenie, evolyutsiya i minerageniya giperbazitovogo massiva Ray-Iz* [Structure, evolution and mineralogy of Ray-Iz hyperbasitic massif]. Eds. V.N. Puchkov, D.S. Shteinberg. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 1990. 228 p.
22. Novakov R.M., Moskaleva S.V., Ivanov V.V., Palamar S.V. Pentlandites and avaruities of hyperbasitic massif of Soldatskaya mountain (Kamchatsky cape peninsula, Eastern Kamchatka). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o zemle*, 2014, no. 2, pp. 137–146. In Rus.
23. Bazylev B.A. Razvitie avaruitsoderzhashchey mineral'noy assotsiatsii v peridotitakh iz zony razloma 15°20' (Atlanticheskii okean) kak odno iz proyavleniy okeanicheskogo metamorfizma [The development of avaruite-containing mineral association in peridotites from the fault zone 15°20' (Atlantic Ocean) as one of manifestations of oceanic metamorphism]. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2000, vol. 2, no. 3–4, pp. 279–293. In Rus.
24. Chashchukhin I.S., Votyakov S.L. Behavior of iron-group elements, oxybarometry, and genesis of unique chromite deposits in the Kempirsai massif. *Geology of Ore Deposits*, 2009, vol. 51, no. 2, pp. 123–138.
25. Lesnov F.P. *Petrologiya poligennykh mafit-ultramafitovykh massivov Vostochno-Sakhalinskoy ofiolitovoy assotsiatsii* [Petrology of polygenic mafic-ultramafic massifs of the East Sakhalin ophiolitic association]. Novosibirsk, Geo Publ., 2015. 240 p.

Received: 26 April 2018.

Information about the authors

Alexey N. Yurichev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University.

УДК 550.47:574:504.064.36(470+571)

СОДЕРЖАНИЕ РТУТИ В ЭПИФИТНЫХ ЛИШАЙНИКАХ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ

Евстафьева Елена Владимировна¹,
e.evstafeva@mail.ru

Богданова Анна Михайловна¹,
annuta2607@yandex.ru

Большунова Татьяна Сергеевна²,
BolshunovaTS@gmail.com

Барановская Наталья Владимировна³,
nata@tpu.ru

Осипова Нина Александровна³,
osipova@tpu.ru

¹ Медицинская академия им. С.И. Георгиевского (структурное подразделение ФГАОУ ВО Крымский Федеральный Университет им. В.И. Вернадского),
Россия, 295006, г. Симферополь, бул. Ленина, 5/7.

² АО «ТомскНИПИнефть»,
Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

В продолжение биомониторинговых исследований ртути на территории Крымского полуострова, направленных на реализацию системного подхода к изучению ее распределения между компонентами биосферы и разработки региональных экологических нормативов этого и других металлов, проведено определение содержания ртути в эпифитных лишайниках, являющихся природными планшетами атмосферной эмиссии тяжелых металлов.

Цель: определить и оценить содержание ртути в пробах эпифитных лишайников, отобранных в центральном, южном, юго-восточном и восточном регионах Крымского полуострова.

Методы. Содержание ртути в лишайниках видов *Xanthoria parietina*, *Evernia prunastri* и *Evernia mesomorpha* определяли атомно-абсорбционным методом с использованием анализатора ртути с зеемановской коррекцией неселективного поглощения «РА-915М», пиролитической приставки «ПИРО-915+» и пакета программ RA915P в МИНОЦ «Урановая геология» Томского политехнического университета, и методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в аккредитованном химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск).

Результаты. Содержание ртути в эпифитных лишайниках, отобранных преимущественно на заповедных территориях южного региона Крыма, а также в парковых зонах городов его центрального, юго-восточного и восточного регионов и вблизи очистных сооружений варьировало в пределах от 0,054 до 0,306 мкг/г и не отличалось от фоновых значений содержания ртути в лишайниках на других территориях Российской Федерации. В то же время наблюдалась существенная неоднородность в территориальном распределении ртути: в лишайниках парковых зон на территории городов ее содержание колебалось в пределах 0,063–0,088 мкг/г, а в горных и предгорных районах южного Крыма было выше в 2 раза. Это может быть связано с геоморфологическими и геохимическими особенностями Главной гряды (глубинные разломы ортогональной системы с ртутными рудопроявлениями и зонами геодинамической активности), а также ее барьерной функцией для воздушных масс, насыщенных морскими аэрозолями, содержащими ртуть. Помимо этого, как свидетельствуют данные моделирования экспертной группы Конвенции LRTAP, существенный вклад может вносить трансграничный перенос ртути. Вариабельность содержания ртути в лишайниках на условно фоновых территориях и интенсивное технологическое развитие Крыма диктуют необходимость дифференцированного подхода к оценке экологической ситуации в отношении этого глобального и опасного загрязнителя на различного типа территориях Крымского полуострова.

Ключевые слова:

Ртуть, лишайник, биосубстрат, биоиндикатор, Республика Крым.

Введение

Глобальная трансформация биосферы и обострение в связи с этим экологических проблем делает остро актуальным использование наиболее чувствительных индикаторов антропогенного воздействия на окружающую среду и здоровье человека. С точки зрения оценки негативного влияния на организм человека значительный интерес представ-

ляют биомониторинговые исследования содержания загрязнителей в тканях организма человека, как конечного консумента большинства биогеохимических трофических цепей, по которым осуществляется круговорот поллютантов. В то же время существует необходимость ориентации и на другие чувствительные индикаторы экологического состояния территорий, что позволит дополнить,

сопоставить и уточнить имеющуюся в регионе экологическую ситуацию, а также учесть полученную информацию при разработке и определении региональных экологических нормативов содержания загрязнителя с учетом природной и антропогенной специфики региона.

К числу наиболее опасных глобальных загрязнителей биосферы относится ртуть, в отношении которой рекомендуется первоочередная инвентаризация выбросов и оценка загрязнения этим металлом территорий [1–5]. И, несмотря на отсутствие существенных промышленных источников загрязнения ртути на территории Крымского полуострова, остается вероятность значимого загрязнения в результате сжигания угля и образования твердых отходов [6], а также трансграничного переноса [7].

Ранее нами проведено биомониторинговое исследование, которое показало, что при отсутствии значимых отклонений от условной допустимой нормы имеется неоднородное распределение содержания ртути в волосах жителей разных территорий Крымского полуострова [8]. Учитывая также то обстоятельство, что влияние ртути на функционирование систем организма выявляется и при очень низком содержании [9–11], а сочетанное воздействие ряда химических факторов в низких дозах может оказывать синергический эффект, дальнейшее изучение ситуации на Крымском полуострове в отношении этого тяжелого металла остается актуальным. О том, что такой риск небезоснователен, свидетельствуют негативные тенденции в изменении состояния здоровья населения в Республике Крым [12], как и во многих регионах мира и Российской Федерации. Особенно актуально это в климатических условиях Крымского полуострова, где высокая температура может увеличивать и без того отличающуюся высокой мобильностью и склонностью к комплексообразованию ртуть [13].

В связи с этим с целью дальнейшего изучения распространенности содержания ртути в компонентах биосферы нами предпринято исследование по определению этого металла в одном из наиболее чувствительных индикаторов атмосферной эмиссии – эпифитных лишайниках [14–17], которые служат своего рода природным планшетом, поглощающим ртуть из атмосферных выпадений [18–20].

Материалы и методики исследования

Исходя из ранее полученных результатов неоднородного распределения содержания ртути в волосах жителей разных регионов Крыма, а также учитывая то обстоятельство, что именно морская и океаническая вода являются средой глобального ртутного загрязнения [21–23], пробы эпифитных лишайников были отобраны на разного типа территориях южного, юго-восточного, восточного и центрального регионов Крымского полуострова, преимущественно прибрежных. Большая часть проб была отобрана на участках природных экоси-

стем, которые можно отнести к фоновым (контрольным), поскольку они расположены на заповедных территориях: горные массивы Ай-Петри, Чатыр-Даг, Демерджи (рис. 1). Остальные пробы были отобраны на урбанизированных территориях (города Симферополь, Керчь, Феодосия), главным образом в парковых зонах, удаленных на расстояние не менее 1 км от возможных источников ртутного загрязнения за исключением двух площадок в г. Феодосия, расположенных вблизи с водопроводно-очистными сооружениями, которые рассматривались как возможный источник ртутного загрязнения.

Образцы эпифитных лишайников вида *Evernia mesomorpha* отобраны летом 2015 г. на горных массивах южного берега Крыма: территории верхнего (1500 м над у.м.) и нижнего плато Чатыр-Дага (1300 м над у.м.) Крымского природного заповедника, а также на Южном склоне Демерджи (1239 м над у.м.). Образцы отбирали с редкостойных молодых деревьев Сосны крымской (*Pinus Pallasiana*) горы Чатыр-Даг, с боярышника Пожарковой (*Crataegus pojarkovae* K.) с горных склонов Демерджи. Всего в 2015 г. отобрано 10 проб.

Отбор проб эпифитных лишайников видов *Xanthoria parietina*, *Evernia prunastri* и *Evernia mesomorpha* в 2016–2017 гг. осуществлялся как на территории природных экосистем – с. Перевальное (Красные пещеры), Крымского природного заповедника, г. Ай-Петри, так и урбоэкосистем – парковые зоны г. Симферополь, г. Керчь, г. Феодосия – по нерегулярной сетке на высоте человеческого роста от поверхности почвы с целью снижения вероятности загрязнения образцов почвами. Виды эпифитных лишайников определены в г. Симферополь по [24]. В 2016–2017 гг. отобрано 11 проб.

Отбор и подготовка к анализу 21 пробы лишайников осуществлены согласно рекомендациям [25–28] и включали высушивание при комнатной температуре, измельчение и перемешивание для достижения наибольшей однородности материала, что обеспечивало представительность выборки.

Содержание ртути в лишайниках, отобранных в 2015 г., определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в аккредитованном химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск). Определение содержания ртути проводили в 10 образцах сухого вещества лишайников. Ошибка определения ртути не превысила 10 %. Всего проанализировано 30 образцов лишайников (3 повторности измерений).

Содержание ртути в лишайниках, отобранных в 2016–2017 гг., определяли атомно-абсорбционным методом с использованием анализатора ртути с зеемановской коррекцией неселективного поглощения «РА-915М», пиролитической приставки «ПИРО-915+» и пакета программ RA915P в Международном инновационном научно-образовательном центре «Урановая геология» Томского политехнического университета. Ошибка определения



Рис. 1. Расположение площадок отбора проб лишайников на территории Республики Крым

Fig. 1. Location of plots of lichens samples selection in the territory of Crimea Republic

Таблица. Содержание ртути в лишайниках, отобранных на территории Крымского полуострова

Table. Mercury content in lichens in the territory of Crimean peninsula

Локализация площадки отбора, год отбора Location of selection plot, year of selection	№ площадки № of plot	Характеристика площадки отбора Characteristic of selection plot	Концентрация ртути, мкг/г Mercury concentration, mkg/g	M±SD, мкг/г M±SD, mkg/g	Количество проб Amount of samples
г. Симферополь Simferopol 2016–2017	1	Ботанический сад, парковая зона, (260 м над у.м.) Botanic garden, park zone (260 m above sea level)	0,088	0,075±0,018	1
	2	Парковая зона у р. Салгир, 20 м от дороги, (240 м над у.м.) Park zone near Salgir river, 20 m from the road, (260 m above sea level)	0,063		1
Красные пещеры, 3 км от с. Перевальное-2, Симферопольский район Red caves, 3 km from Perevalnoe-2, Simferopol district 2016–2017	3	Водопад Су-Учхан, (570 м над у.м.) Su-Uchkhan waterfall, (570 m above sea level)	0,101	0,099±0,021	1
	4	Лесная зона, (516 м над у.м.) Forest zone, (516 m above sea level)	0,092		1
	5	Лесная зона, (475 м над у.м.) Forest zone, (475 m above sea level)	0,127		1
	6	30 м от дороги, (430 м над у.м.) 30 m from the road, (430 m above sea level)	0,078		1
г. Керчь Kerch 2016–2017	7	Городской пляж, 30 м от моря, (1 м над у.м.) City beach, 30 m from the sea, (1 m above sea level)	0,076	0,076	1
г. Феодосия Feodosia 2016–2017	8	200 м от бассейнов очистных сооружений, 400 м от моря, (85 м над у.м.) 200 m from the pools of treatment facilities, 400 m from the sea, (85 m above sea level)	0,054	0,101±0,066	2
	9	100 м от бассейнов очистных сооружений, 300 м от моря, (60 м над у.м.) 100 m from the pools of treatment facilities, 300 m from the sea, (60 m above sea level)	0,147		1
Гора Ай-Петри Ai-Petri Mountain 2016	10	Плато г. Ай-Петри (1200 м над у.м.), лесная зона Plateau of Ai-Petri (1200 m above sea level), forest zone	0,306	0,306	1
Крымский природный заповедник Crimean nature conservancy area 2015	11	Верхнее плато г. Чатыр-Даг (1500 м над у.м.) Upper plateau of Chatyr-Dag (1500 m above sea level)	0,104	0,131±0,040	2
	12	Нижнее плато г. Чатыр-Даг (1300 м над у.м.) Lower plateau of Chatyr-Dag (1300 m above sea level)	0,161		4
Демерджи-яйла Demerdzhi-Yaila 2015	13	Южная Демерджи (1239 м над у.м.) South Demerdzhi (1239 m above sea level)	0,110	0,110±0,050	4

ртути не превысила 10 %. Всего проанализировано 33 образца лишайников (3 повторности измерений).

Навеску предварительно-измельченных и доведенных до воздушно-сухого состояния пробы лишайников видов *Xanthoria parietina*, *Evernia prunastri* и *Evernia mesomorpha* (2016–2017 гг.) с помощью кварцевой лодочки-дозатора вводили в приёмное гнездо термоблока ртутного атомизатора. В термоблоке происходит термическое разложение образца с одновременной атомизацией ртути. Приставка с помощью специального устройства соединена с анализатором ртути РА-915, где происходит определение ртути, при этом нижний предел обнаружения составляет 0,0025 мкг/г. Обработка результатов измерений осуществляется с помощью программного обеспечения «Рапид». Предварительными экспериментами в режиме «Форсаж» показано, что выбранный режим (скорость прокачки воздуха 0,8–1,2 л/мин., температура испарителя 680–740 °С) обеспечивает полноту выделения ртути. В качестве аналога при проведении анализа используются ПНДФ 16.1.2.23–2000 [29]. Для построения и контроля стабильности градуировочных характеристик при определении массовой доли ртути в твердых образцах лишайников использовали стандартный образец состава листа березы ЛБ-1, ГСО 8923–2007, $C_{\text{атт}} = 0,037 \pm 0,006$ мкг/г, $C_{\text{изм}} = 0,033 \pm 0,001$ мкг/г.

Анализ полученных результатов проводили с использованием «Microsoft Office Excel 2007». Для описания полученных на всех площадках мониторинга данных использовали средние значения (M) и среднеквадратическое отклонение (SD), а также минимальные ($\min$) и максимальные ($\max$) значения концентраций ртути.

Результаты исследования и обсуждение

Содержание ртути в лишайниках, отобранных на различных участках центрального, южного, юго-восточного и восточного регионов Крымского

полуострова варьировало в пределах от 0,054 до 0,306 мкг/г (таблица). При этом в лишайниках парковых зон на территории городов оно колебалось в пределах 0,063–0,088 мкг/г.

Такие величины сопоставимы с содержанием ртути в эпифитных лишайниках различных регионов Сибири, где, однако, наблюдали значительные различия в зависимости от района исследования: от 0,89 мкг/г в Читинской области до содержания ртути ниже предела обнаружения 0,001 мкг/г в лишайниках Алтайского края и районах Ямало-Ненецкого Автономного округа [30]. Однако при этом не указаны виды исследованных лишайников, в то время как показано, что их способность к аккумуляции ртути существенно различается. Содержание ртути в лишайниках тех же видов, что и рассматриваемые в настоящей статье, соответствует полученным нами данным для горных и предгорных территорий [31]. Низкие значения уровня ртути в эпифитных лишайниках (0,01–0,31 мкг/г) сопоставимы также с ее содержанием в эпигейных лишайниках водосборного бассейна Белого моря на территории Мурманской и Архангельской областей и Республики Карелия [32].

В целом анализ данных русскоязычной литературы [17, 33–37] показывает отсутствие значимых различий в выявляемых концентрациях ртути в эпифитных лишайниках разных регионов Российской Федерации и СНГ за исключением таких территорий, как, например, Урское хвостохранилище в Кемеровской области, где более высокие концентрации обусловлены нахождением объектов в пределах рудных полей с золотополиметаллической специализацией (рис. 2). В совокупности с данными, полученными в других регионах мира [16, 36], это дает основание для заключения о том, что наблюдаемые в лишайниках Крыма содержания ртути имеют преимущественно естественное происхождение, поскольку вблизи источников техногенного ртутного загрязнения оно значительно выше и составляет, как правило, более 1 мкг/г [38].

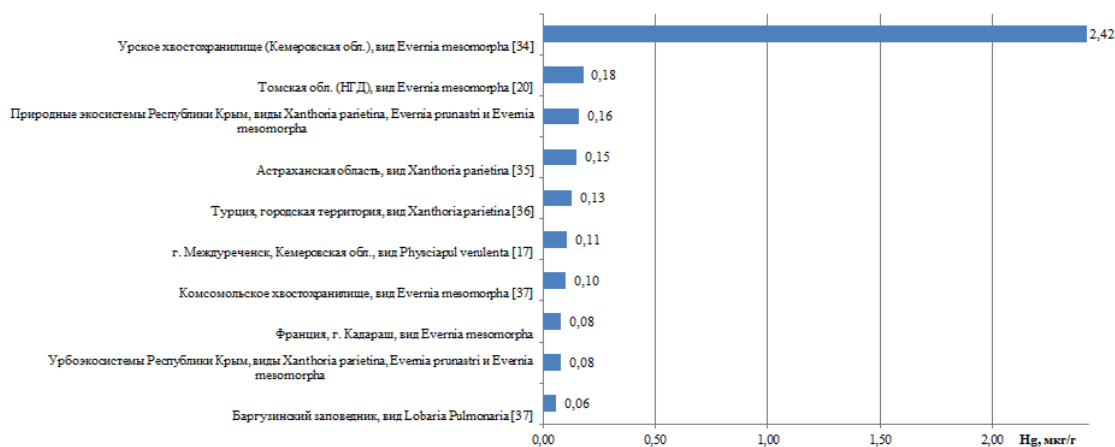


Рис. 2. Содержание ртути в лишайниках различных территорий Российской Федерации и Евразии, мкг/г

Fig. 2. Mercury content in lichens from various territories of the Russian Federation and Eurasia, mkg/g

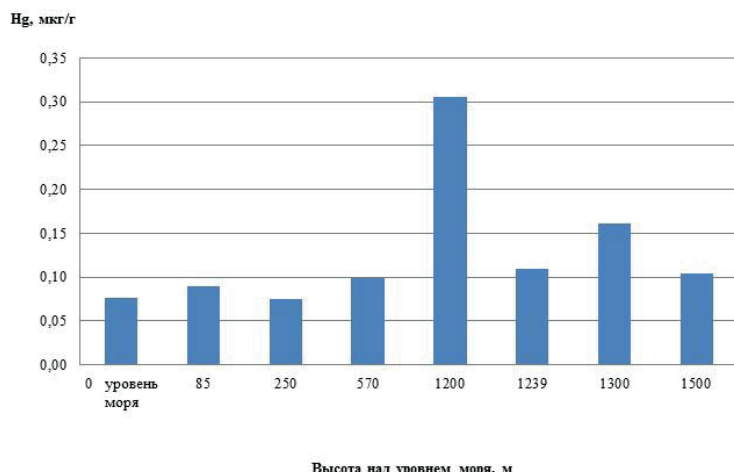


Рис. 3. Содержание ртути (мкг/г) в эпифитных лишайниках, произрастающих на разной высоте над уровнем моря

Fig. 3. Mercury content (mkg/g) in the epiphytic lichens located at different altitude above sea level

В то же время обращают на себя внимание довольно существенные территориальные различия в содержании этого металла в лишайниках, растущих на используемых в настоящем исследовании мониторинговых площадках Крымского полуострова. Так, наиболее высокие уровни содержания ртути выявлены на горных и предгорных территориях южного берега (рис. 3), причем эти величины сравнимы с содержанием в лишайниках, растущих вблизи источника антропогенного загрязнения (водопроводно-очистные сооружения в г. Феодосия). При этом в лишайниках, расположенных на высоте от 600 до 1500 м над уровнем моря, значения ртути превышали таковые в более низко растущих лишайниках (0–570 м) вдвое. Стоит отметить, что максимальные величины были характерны для лишайников, произрастающих не на самой большой из исследованных высот (г. Ай-Петри), однако с наиболее близким расположением к морскому побережью.

Более высокие концентрации ртути в пробах, отобранных на территориях Южного побережья, в сравнении с площадками, расположенными в центральной части Крымского полуострова (г. Симферополь), равно как и данные ранее проведенных биомониторинговых исследований содержания ртути в волосах жителей разных регионов, предположительно связаны с тем, что в приморских районах наряду с традиционными источниками (транспорт, промышленность) в химическое загрязнение атмосферного воздуха значительный вклад вносят токсические вещества, попадающие в атмосферу с морскими аэрозолями [1, 2]. Считается, что для регионов с преимущественной розой ветров «море–берег», к которым относятся в течение значительной части года морские побережья, эта проблема приобретает особую актуальность [28], особенно в отношении ртути, которая более подвержена эмиссии и легко переносится на большие расстояния от локального источника загрязнения [7].

Нельзя также исключить влияния на прибрежных территориях антропогенных источников (карьеры по разработке стройматериалов, промышленные предприятия, аграрно-промышленные и коммунально-бытовые объекты) [39].

В пользу того, что именно морские аэрозоли могут быть преимущественным «поставщиком» ртути, свидетельствуют и данные о распределении общей массы ртути между компонентами биосферы в Крыму. Так, согласно А.И. Радченко [33], общая масса ртути в биосфере Крыма оценивается в $10 \cdot 10^{-9}$ т, из них $0,2 \cdot 10^{-9}$ т находится в коренных породах, $0,34 \cdot 10^{-9}$ т – в почвах, а наибольшая доля – $1,12 \cdot 10^{-9}$ и $8,5 \cdot 10^{-9}$ т – приходится на гидросферу и атмосферу соответственно.

В то же время содержание ртути в лишайниках на территории г. Керчи, расположенного на восточном побережье Черного моря, было низким и не отличалось от данных, характерных для других урбанизированных территорий. Это может быть обусловлено разнообразием типов территорий, которое присуще Крымскому полуострову. Так, согласно разработанной классификации геохимических ландшафтов Республики Крым [39], ртуть может являться даже дефицитным элементом для таких ландшафтных зон, как прибрежные лиманно-морская зона низменной солонцово-солончаковой равнины, сухие степи слаборасчленённой равнины, в том числе присивашские, лесостепные, аквальные озерно-(лиманно-) морские. В то же время авторами выделены низкогорные широколиственно-лесные зоны, для которых характерно избыточное содержание ртути, и среднегорные горнолесные ландшафты, где ртуть может считаться элементом накопления, с чем согласуются и наблюдаемые нами результаты анализа содержания ртути в лишайниках. Последнее объясняется также тем обстоятельством, что для горного и предгорного Крыма характерно наличие природных геохимических источников ртути: глубинные разломы

ортогональной системы с ртутными рудопроявлениями и зонами геодинамической активности.

По всей видимости, представленные в данной работе результаты свидетельствуют о необходимости дифференцированного подхода к анализу ситуации с учетом неоднородности природных условий такой территории, как Крымский полуостров.

Помимо рассмотренных местных источников ртути на данных территориях существенный вклад может вносить ее трансграничный перенос. Главная гряда Крымских гор выполняет роль естественного барьера для переносимых воздушных масс, содержащих ртуть. Так, на сопредельных с Крымским полуостровом территориях Черноморского побережья (Южный федеральный округ, приграничные районы Ростовской области, Краснодарского края) происходят трансграничные выпадения ртути, составляющие до 25 и более г/км²/год [40], а по данным моделирования экспертов Конвенции о трансграничных переносах атмосферных загрязнителей на дальние расстояния трансграничные выпадения ртути на южном берегу Крыма в 2010 г. составляли 15–20 г/км²/год, и останутся приблизительно на том же уровне к 2020 г., что вдвое выше выпадений в равнинном Крыму [7].

Таким образом, как невысокие величины обнаруженного содержания ртути, так и анализ возможных ее источников дает основание для заключения о преимущественно естественном происхождении ртути в лишайниках на исследованных территориях. Тем не менее, разный вклад естественных источников ртути в ртутное загрязнение лишайников на различных территориях, трансграничный перенос и антропогенные источники, роль которых в связи с развитием Республики Крым будет только возрастать в ближайшее время, свидетельствуют о необходимости дальнейшего изучения распределения этого токсичного элемента в компонентах экосистем Крымского полуострова.

Заключение

Содержание ртути в лишайниках, отобранных преимущественно на заповедных территориях южного региона Крыма, а также в парковых зонах городов центрального, восточного и вблизи очистных сооружений юго-восточного регионов полуострова, варьировало в пределах от 0,054 до 0,306 мкг/г. Сопоставление с концентрациями

ртути в лишайниках на территории Российской Федерации и других стран дает основание для заключения о преимущественно естественном происхождении наблюдаемых величин. В то же время имеет место существенная неоднородность в территориальном распределении ртути: в лишайниках парковых зон на территории городов ее содержание колебалось в пределах 0,063–0,088 мкг/г, а в горных и предгорных районах южного Крыма было выше в 2 раза. Это обусловлено высоким разнообразием типов территорий, присущим Крымскому полуострову, в частности, геоморфологическими и геохимическими особенностями Главной гряды (глубинные разломы ортогональной системы с ртутными рудопроявлениями и зонами геодинамической активности), а также ее барьерной функцией для воздушных масс, насыщенных морскими аэрозолями, содержащими ртуть. Помимо локальных источников ртути существенный вклад может вносить ее трансграничный перенос. По данным моделирования международной экспертной группы Конвенции о трансграничных переносах атмосферных загрязнителей ее выпадения на южнотерритории Крыма может вдвое превышать величины на равнинных территориях и составлять до 20 г/км²/год.

Такая неоднородность распределения ртути на условно фоновых территориях наряду с интенсивным технологическим развитием Крыма в последние годы диктует необходимость дифференцированного подхода и особенно внимательного отношения к мониторинговым исследованиям и контролю ситуации в отношении такого глобального и опасного загрязнителя, как ртуть.

Настоящая работа выполнена при поддержке Программы развития Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского» на 2015–2024 годы в рамках реализации академической мобильности по проекту «Развитие научных исследований в области экспериментальной медицины – РНИЭМ» в ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет в 2016 г.; в рамках программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета среди ведущих мировых исследовательских центров; определение содержания ртути в лишайниках выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18–29–24212\18.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spranger T., Lorenz U., Gregor H.D. Manual on methodologies and criteria for modeling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. – Berlin: Fed. Environ. Agency (Umweltbundesamt), UBA-Texte, 2004. – 307 p.
2. Zhao J., Becker P.R., Meng X.Z. Securing a Strategy to Monitor Emerging Pollutants in the Regional and Global Environment: 2013 International Conference on Environmental Specimen Banks // Environmental Science and Pollution Research International. – 2015. – V. 22. – № 3. – P. 1555–1558.
3. IMOC – Inter organizational Programme for the Sound Management of Chemicals. A cooperative agreement among UNEP, ILO, FAO, WHO, UNIDO, UNITAR and OECD. Global Mercury Assessment. – Geneva: UNEP Chemicals, 2002. – 258 p.
4. Минаматская конвенция о ртути // ЮНЕП, ООН, 2013. – 65 с. URL: http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/Booklets/Minamata_convention_Russian.pdf (дата обращения: 19.06.2018).
5. Пилотный проект по формированию кадастра ртутных загрязнений в РФ. URL: <https://www.mercury2017.ru/dokumenty> (дата обращения: 19.06.2018).
6. Ртутное загрязнение в России: проблемы и рекомендации / под ред. А. Романова, О. Сперанской, О. Цитцер. – Коломна: Коломенская типография, 2016. – 118 с.

7. Slootweg J., Maximilian P., Hettelingh J. Progress in the modelling of critical thresholds and dynamic modelling, including impacts on vegetation in Europe // CCE Status Report. – 2010. – 182 p.
8. Экологические и биомониторинговые исследования ртути в Крымском регионе / Е.В. Евстафьева, Н.В. Барановская, С.Л. Тымченко, А.М. Богданова, Г.П. Нараев, Н.А. Сологуб, Д.В. Наркович // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 96–105.
9. Евстафьева Е.В. Оценка экологического риска для здоровья на территории Республики Крым // Проблемы анализа риска. – 2014. – Т. 11. – № 5. – С. 30–38.
10. Евстафьева И.А. Особенности функционального состояния центральной нервной и сердечнососудистой систем в связи с содержанием тяжелых металлов в организме подростков: дис. ... канд. биол. наук. – Симферополь, 2003. – 130 с.
11. Слюсаренко А.Е. Иммунологическая реактивность организма в различных условиях техногенного загрязнения среды тяжелыми металлами: дис. ... канд. биол. наук. – Симферополь, 2003. – 157 с.
12. Доклад «О состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым в 2016 году». – Ижевск: ООО «Принт-2», 2017. – 300 с.
13. Интоксикация человеческого организма металлической ртутью / В.Г. Моисеенко, В.И. Радомская, С.М. Радомский, Ю.Г. Пискунов, Т.А. Савинова, А.В. Леншин // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2004. – № 3. – С. 100–110.
14. Element analysis of biological materials. Current problems and techniques with special reference to trace elements. Appendix II. Technical reports series. – Vienna: IAEA, 1980. – № 197. – P. 351–367.
15. Kist A.A., Zhuk L.I. Human hair composition and the problems of global ecology. – Tashkent, USSR: Institute of Nuclear Physics of the Uzbek Academy of Sciences, 1991. – 60 p.
16. Bargagli R. Moss and lichen biomonitring of atmospheric mercury: a review // Science of the Total Environment. – 2016. – V. 572. – P. 216–231.
17. Исупова А.А., Ялалтдинова А.Р. Количественное определение содержания ртути в лишайнике вида *Physcia pulchra* на примере промышленного города Междуреченска // Экологические проблемы региона и пути их решения: Материалы национальной научно-практической конференции «Эко-BOOM». – Омск, 2016. – С. 143–147.
18. Bargagli R. Trace Elements in Terrestrial Plants: an Ecophysiological Approach to Biomonitoring and Biorecovery. – B.: Springer, 1998. – 324 p.
19. Lichen monitoring as a potential tool in environmental forensics: case study of the Cu smelter and former mining town of Karabash, Russia / O.W. Purvis, B.J. Williamson, B. Spiro, V. Udachin, I.N. Mikhailova, A. Dolgoplova // Geological Society, London, Special Publications. – 2013. – V. 384. – P. 133–136.
20. Mezhibor A.M., Bolshunova T.S., Rikhvanov L.P. Geochemical features of sphagnum mosses and epiphytic lichens in oil and gas exploitation areas (the case of Western Siberia, Russia) // Environmental Earth Sciences. – 2016. – V. 75. – № 18. – P. 1260.
21. Integrating Mercury Science and Policy in the Marine Context: Challenges and Opportunities / K.F. Lambert, D.C. Evers, K.A. Warner, S.L. King, N.E. Selin // Environmental Research. – 2012. – № 119. – P. 132–142.
22. Surveying mercury levels in hair, blood and urine of under 7-year old children from a coastal city in China / G. Chen, X. Chen, C. Yan, X. Wu, G. Zeng // International journal of environmental research and public health. – 2014. – V. 11. – № 11. – P. 12029–12041.
23. Биомониторинг прибрежных вод Черного моря / И.И. Руднева, Н.Ф. Шевченко, И.Н. Залевская, Н.В. Жерко // Водные ресурсы. – 2005. – Т. 32. – № 2. – С. 238–246.
24. Окснер А.Н. Определитель лишайников СССР. Морфология, систематика и географическое распространение. Вып. 2. – Л.: Наука, 1974. – 284 с.
25. Язиков Е.Г., Барановская Н.В., Игнатова Т.Н. Эколого-геохимическая оценка территории района города по данным биогеохимической съемки. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 32 с.
26. Bargagli R., Nimis P.L. Guidelines for the use of epiphytic lichens as biomonitors of atmospheric deposition of trace elements // Monitoring with Lichen – Monitoring Lichens. – Dordrecht: Kluwer, 2002. – P. 295–299.
27. Зырина Н.Г., Малахова С.Г. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами. – М.: Гидрометеиздат, 1981. – 187 с.
28. Разработка научных основ и создание экспериментального образца технологии оперативного контроля качества воздуха в приморских городах и курортных зонах / В.Б. Лапшин, М.А. Чичаева, Д.М. Полевщиков, И.С. Матвеева, Т.В. Гребенникова, М.В. Колесников, Г.Н. Чиквиладзе, С.С. Плетенев, А.В. Сыроешкин // Труды Государственного океанографического института. – 2009. – № 212. – С. 308–322.
29. Методика выполнения измерений массовой доли ртути в пробах пищевых продуктов, продовольственного сырья, кормов, комбикормов и сырья для их производства атомно-абсорбционным методом с использованием анализатора ртути РА-915+ с приставкой РП-91С. Методика М 01-46-2007.
30. Головацкая Е.А., Ляпина Е.Е. Распределение валовой ртути в профиле торфяных почв Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. – 2009. – № 2. – С. 299–306.
31. Ляпина Е.Е. Экогеохимия ртути в природных средах Томского региона: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2012. – 154 с.
32. Геохимия эпигейных лишайников водосборного бассейна Белого моря / В.П. Шевченко, О.С. Покровский, Д.П. Стародымова, Е.В. Васюкова, А.П. Лисицын, С.И. Дровнина, Н.С. Замбер, Н.М. Махнович, А.С. Саввичев, И. Сонке // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 450. – № 1. – С. 87–93.
33. Радченко А.И. Распределение ртути в ландшафтно-геохимических зонах Крыма // Минералогический журнал. – 1999. – Т. 21. – № 1. – С. 79–84.
34. Biogeochemical features of epiphytic lichens from the area of the tailing of a gold-polymetallic deposit (Kemerovo region, Russia) comparative to a reference area / T.S. Bolshunova, L.P. Rikhvanov, A.M. Mezhibor, N.V. Baranovskaya, D.V. Yusupov // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – 2017. – V. 17. – № 51. – P. 165–172.
35. Закутнова В.И., Пилипенко Т.А. Влияние тяжелых металлов на лишайники // Вестник ОГУ. – 2004. – № 12. – С. 112–116.
36. Biomonitoring of airborne metals using the Lichen *Xanthoparmelia* in Kocaeli Province, Turkey / A.D. Demiray, I. Yolcubal, N.H. Akyol, G. Çobanoğlu // Ecological Indicators. – 2012. – V. 18. – P. 632–643.
37. Biogeochemical characteristics of epiphytic lichen *Lobariapulmonaria* of the Barguzin nature reserve (the Republic of Buryatia, Russia) / T. Bolshunova, L. Rikhvanov, A. Mezhibor, L. Zhornyak, N. Baranovskaya, E. Eremina // Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. – 2018. – V. 26. – № 2. – С. 120–127.
38. Ориентировочные фоновые и допустимые биологические уровни некоторых тяжелых металлов в биосубстратах у населения, не имеющего с ними профессионального контакта. Критерии

- оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. Приложение 1. Утверждено МПР РФ 30.11.1992. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90799/37197b6e9878843ed021523902152b55a3767c1c/ (дата обращения: 19.03.2018).
39. Новикова Л.Н., Новиков Ю.А. Геохимическая классификация ландшафтов Крыма и их техногенное загрязнение // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2008. – Т. 21. – № 3. – С. 231–237.
40. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2015 году». – М.: Минприроды России; НИА-Природа, 2016. – 639 с.

Поступила 10.11.2018 г.

Информация об авторах

Евстафьева Е.В., доктор медицинских наук, доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой физиологии нормальной и лаборатории медико-экологического мониторинга Медицинской академии им. С.И. Георгиевского (структурное подразделение ФГАОУ ВО Крымский Федеральный Университет им. В.И. Вернадского).

Богданова А.М., младший научный сотрудник Центральной научно-исследовательской лаборатории Медицинской академии им. С.И. Георгиевского (структурное подразделение ФГАОУ ВО Крымский Федеральный Университет им. В.И. Вернадского).

Большунова Т.С., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер отдела экологического нормирования АО «ТомскНИПИнефть».

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

Осипова Н.А., кандидат химических наук, доцент Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.47:574:504.064.36(470+571)

MERCURY CONTENT IN THE EPIPHYTIC LICHENS OF CRIMEA REPUBLIC

Elena V. Evstafeva¹,
e.evstafeva@mail.ru

Anna M. Bogdanova¹,
annuta2607@yandex.ru

Tatiana S. Bolshunova²,
BolshunovaTS@gmail.com

Nataliya V. Baranovskaya³,
nata@tpu.ru

Nina A. Osipova³,
osipova@tpu.ru

¹ V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Medical Academy Named after S.I. Georgievsky,
5/7, Lenin Avenue, Simferopol, 295006, Russia.

² Tomsk Oil and Gas Research and Design Institute,
72, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

In continuation of biomonitoring investigation of mercury on Crimean peninsula territory, aimed at systemic approach realization to determine its distribution between components of biosphere and processing of regional ecological standards for this and other metals, the mercury content was determined in epiphytic lichens that are natural planchet of atmospheric emission.

The aim of this study was to evaluate mercury content in the epiphytic lichens from the central, southern, southern-eastern and eastern districts of the Crimean peninsula.

Methods. Mercury content in lichens was determined by atomic adsorption analysis using mercury analyzer RA-915+ with PYRO-915 attachment in the laboratory of nuclear-geochemical methods of investigation in IISEC «Uranium geology» in National Research Tomsk Polytechnic University and by inductively coupled plasma-mass spectrometry in the accredited chemical analysis center «Plazma» (Tomsk).

Results. Mercury content in epiphytic lichens in reserved southern territories and park zones of cities in central, eastern and near treatment facilities in southern-eastern regions of Crimea Republic varied from 0,054 to 0,306 mkg/g and did not differ from mercury level in background exposure on other territories of Russian Federation. At the same time there was an essential territorial heterogeneity of mercury content: in lichens from park zones of cities mercury content varied from 0,063 to 0,088 mkg/g, in mountainous and foothill areas of the southern Crimea it was twice higher. It can be explained by geomorphological and geochemical features of the Main ridge (deep breaks of orthogonal system with mercury ore occurrences and zones of geodynamic activity) and its barrier function for the air masses containing mercury sea aerosols. Besides, as it follows from the results of Convention LRTAP expert groups modeling, the significant contribution may be brought by Transboundary Air Pollution. The territorial heterogeneity of mercury content in lichens on conditionally background exposure territories together with intensive technological development of the Crimea dictate the necessity of the differentiated approach to ecological situation assessment in relation to such global and dangerous pollutant as mercury on different types of Crimea peninsular territories.

Key words:

Mercury, lichens, biosubstrate, bioindicator, Crimean peninsula.

The research was supported by the program of development of Crimea Federal University named after V.I. Vernadsky for 2015–2024 within implementation of academic mobility upon the project «Development of scientific research in experimental medicine» at National Research Tomsk Polytechnic University in 2016; within the Program of enhancement of National Research Tomsk Polytechnic University competitiveness among the leading world research centers; mercury analysis was supported by the RFBR within the scientific project no. 18–29–24212\18.

REFERENCES

1. Spranger T., Lorenz U., Gregor H.D. *Manual on methodologies and criteria for modeling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends*. Berlin, Fed. Environ. Agency (Umweltbundesamt), UBA-Texte, 2004. 307 p.
2. Zhao J., Becker P.R., Meng X.Z. *Securing a Strategy to Monitor Emerging Pollutants in the Regional and Global Environment*. 2013 International Conference on Environmental Specimen Banks. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 1555–1558.
3. IMOC – Inter organizational Programme for the Sound Management of Chemicals. *A cooperative agreement among UNEP, ILO, FAO, WHO, UNIDO, UNITAR and OECD. Global Mercury Assessment*. Geneva, UNEP Chemicals, 2002. 258 p.
4. *Minamatskaya konventsiya o rtuti* [Minamatsky convention on mercury]. UNEP, UN 2013. 65 p. Available at: <http://www.mer->

- curyconvention.org/Portals/11/documents/Booklets/Minamata_convention_Russian.pdf (accessed 19 June 2018).
5. *Pilotny proekt po formirovaniyu kadastra rtutnykh zagryazneniy v RF* [The Pilot project on formation of the inventory of mercury pollution in the Russian Federation]. Available at: <https://www.mercury2017.ru/dokumenty> (accessed 19 June 2018).
6. *Rtutnoe zagryaznenie v Rossii: problemy i rekomendatsii* [Mercury pollution in Russia: problems and recommendations]. Eds. A. Romanov, O. Speranskaya, O. Tsitser. Kolomna, Kolomna typography, 2016. 118 p.
7. Slootweg J., Posch M., Hettelingh J.-P. *Progress in the Modelling of Critical Thresholds and Dynamic Modelling, including Impacts on Vegetation in Europe*. CCE Status Report, 2010. 182 p.
8. Evstafeva E.V., Baranovskaya N.V., Tymchenko S.L., Bogdanova A.M., Naraev G.P., Sologub N.A., Narkovich D.V. Environmental and biomonitoring mercury research in the Crimean region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 96–105. In Rus.
9. Evstafeva E.V. Otsenka ekologicheskogo riska dlya zdorovya na territorii Respubliki Krym [Assessing the environmental risk to health in the Republic of Crimea]. *Problemy analiza riska*, 2014, vol. 11, no. 5, pp. 30–38.
10. Sloutseva I.A. *Osobennosti funktsionalnogo sostoyaniya tsentralnoy nervnoy i serdechnosudustoy sistem v svyazi s soderzhaniem tyazhelykh metallov v organizme podrostkov*. Dis. Kand. nauk [Features of functional state of the central nervous and cardiovascular systems in relation to the content of heavy metals in the body of teenagers. Cand. Diss.]. Simferopol, 2003. 130 p.
11. Slyusarenko A.E. *Immunologicheskaya reaktivnost organizma v razlichnykh usloviyakh tekhnogennogo zagryazneniya sredi tyazhelymi metallami*. Dis. Kand. nauk [Immunological reactivity of the organism in different conditions of technogenic pollution with heavy metals. Cand. Diss.]. Simferopol, 2003. 157 p.
12. *Doklad «O sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredi na territorii Respubliki Krym v 2016 godu»* [The report. About the state and protection of the environment on the territory of the Republic of Crimea in 2016]. Izhevsk, OOO «Print-2», 2017. 300 p.
13. Moiseenko V.G., Radomskaya V.I., Radomsky S.M., Piskunov Yu.G., Savinova T.A., Lenshin A.V. Intoxication of the human organism by the metal mercury. *Bulletin of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2004, no. 3, pp. 100–110. In Rus.
14. Element analysis of biological materials. *Current problems and techniques with special reference to trace elements*. Appendix II. Technical reports series, 1980, no. 197, pp. 351–367.
15. Kist A.A., Zhuk L.I. *Human hair composition and the problems of global ecology*. Tashkent, USSR, Institute of Nuclear Physics of the Uzbek Academy of Sciences, 1991. 60 p.
16. Bargagli R. Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: a review. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 572, pp. 216–231.
17. Isupova A.A., Yalaltidinova A.R. Kolichestvennoe opredelenie soderzhaniya rtuti v lishaynike vida Physciapul verulenta na primere promyshlennogo goroda Mezhdurechenska [Quantitative determination of mercury content in a lichen of the species Physciapul verulenta by the example of the industrial city of Mezhdurechensk]. *Ekologicheskie problemy regiona i puti ikh resheniya. Materialy natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Eko-BOOM»* [Materials of the national scientific and practical conference «Eco-BOOM»]. Omsk, 2016. pp. 143–147.
18. Bargagli R. *Trace Elements in Terrestrial Plants: an Ecophysiological Approach to Biomonitoring and Biorecovery*. B., Springer, 1998. 324 p.
19. Purvis O.W., Williamson B.J., Spiro B., Udachin V., Mikhailova I.N., Dolgoplova A. Lichen monitoring as a potential tool in environmental forensics: case study of the Cu smelter and former mining town of Karabash, Russia. *Geological Society, London, Special Publications*, 2013, vol. 384, pp. 133–136.
20. Mezhibor A.M., Bolshunova T.S., Rikhvanov L.P. Geochemical features of sphagnum mosses and epiphytic lichens in oil and gas exploitation areas (the case of Western Siberia, Russia). *Environmental Earth Sciences*, 2016, vol. 75, no. 18, p. 1260.
21. Lambert K.F., Evers D.C., Warner K.A., King S.L., Selin N.E. Integrating Mercury Science and Policy in the Marine Context: Challenges and Opportunities. *Environmental Research*, 2012, no. 119, pp. 132–142.
22. Chen G., Chen X., Yan C., Wu X., Zeng G. Surveying mercury levels in hair, blood and urine of under 7-year old children from a coastal city in China. *International journal of environmental research and public health*, 2014, vol. 11, no. 11, pp. 12029–12041.
23. Rudneva I.I., Shevchenko N.F., Zalevskaya I.N., Zherko N.V. Biomonitoring of Coastal Waters of the Black Sea. *Vodnyye resursy*, 2005, vol. 32, no. 2, pp. 238–246. In Rus.
24. Oksner A.N. *Opredelitel lishaynikov SSSR. Morfologiya, sistematika i geograficheskoe rasprostranenie* [Lichen indicator in USSR. Morphology, systematics and geographical propagation]. Leningrad, Nauka Publ., 1974. Iss. 2, 284 p.
25. Yazikov Y.G., Baranovskaya N.V., Ignatova T.N. *Ekologo-geokhimicheskaya otsenka territoriy rayona goroda po dannym biogeokhimicheskoy semki* [Ecological and geochemical estimation of the territory of the city area according to biogeochemical survey data]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2009. 32 p.
26. Bargagli R., Nimis P.L. Guidelines for the use of epiphytic lichens as biomonitors of atmospheric deposition of trace elements. *Monitoring with Lichen – Monitoring Lichens*. Dordrech, Kluwer, 2002. pp. 295–299.
27. Zyrina N.G., Malakhova S.G. *Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu polevykh i laboratornykh issledovaniy pochv i rasteniy pri kontrole zagryazneniya okruzhayushchey sredi metallami* [Methodological recommendations for conducting field and laboratory studies of soils and plants in the control of environmental pollution by metals]. Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1981. 187 p.
28. Lapshin V.B., Chichayeva M.A., Polevshchikov D.M., Matveyeva I.S., Grebennikova T.V., Kolesnikov M.V., Chikviladze G.N., Pletenev S.S., Syroyeshkin A.V. Basic research and developmental prototype of technology for express air quality control in coastal cities and resorts. *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*, 2009, no. 212, pp. 308–322. In Rus.
29. *Metodika vypolneniya izmereniy massovoy doli rtuti v probakh pishchevyykh produktov, prodovolstvennogo syrnya, kormov, kombinov i syrnya dlya ikh proizvodstva atomno-absorbtsionnym metodom s ispolzovaniem analizatora rtuti RA-915 s pristavkoy RP-91S. Metodika M 01-46-2007* [Methods of measurement of mercury mass share in probes of foodstuff, food staples, forages, compound feeds and raw materials for their production by atomic adsorption analysis using mercury analyzer PA-915+ with an attachment RP-91C. Technique of M 01-46-2007].
30. Golovatskaya E.A., Lyapina E.E. Distribution of total mercury in peat soil profiles in West Siberia. *Siberian Ecological Journal*, 2009, no. 2, pp. 299–306. In Rus.
31. Lyapina Y.Y. *Ekogeokhimiya rtuti v prirodnnykh sredakh Tomskogo regiona*. Dis. Kand. nauk [Ecogeochimistry of mercury in natural environments of Tomsk region. Cand. Diss.]. Tomsk, 2012. 154 p.
32. Shevchenko V.P., Pokrovskiy O.S., Starodymova D.P., Vasyukova Y.V., Lisitsyn A.P., Drovnina S.I., Zamber N.S., Makhnovich N.M., Savichev A.S., Sonke Y. Geochemistry of terricolous lichens in the White Sea catchment area. *Doklady Akademii nauk*, 2013, vol. 450, no. 1, pp. 87–93. In Rus.
33. Radchenko A.I. *Raspredeleniye rtuti v landshaftno-geokhimicheskikh zonakh Kryma* [Mercury distribution in landscape-geochemical areas of the Crimea]. *Mineralogicheskii zhurnal*, 1999, vol. 21, no. 1, pp. 79–84.

34. Bolshunova T.S., Rikhvanov L.P., Mezhibor A.M., Baranovskaya N.V., Yusupov D.V. Biogeochemical features of epiphytic lichens from the area of the tailing of a gold-polymetallic deposit (Kemerovo region, Russia) comparative to a reference area. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2017, vol. 17, no. 51, pp. 165–172.
35. Zakutnova V.I., Pilipenko T.A. Influence of heavy metals on lichens. *Vestnik OGU*, 2004, no. 12, pp. 112–116. In Rus.
36. Demiray A.D., Yolcubal I., Akyol N.H., Çobanoğlu G. Biomonitoring of airborne metals using the Lichen *Xanthoria parietina* in Kocaeli Province, Turkey. *Ecological Indicators*, 2012, vol. 18, pp. 632–643.
37. Bolshunova T., Rikhvanov L., Mezhibor A., Zhornyak L., Baranovskaya N., Eremina E. Biogeochemical characteristics of epiphytic lichen *Lobariapulmonaria* of the Barguzin nature reserve (the Republic of Buryatia, Russia). *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2018, vol. 26, no. 2, pp. 120–127.
38. Orientirovochnye fonovyie i dopustimye biologicheskie urovni nekotorykh tyazhelykh metallov v biosubstratakh u naseleniya, ne imeyushchego s nimi professionalnogo kontakta [Indicative background and permissible biological levels of some heavy metals in biosubstrates of people without occupational exposure to them]. *Kriterii otsenki ekologicheskoy obstanovki territoriy dlya vyvayeniya zon chrezvychaynoy ekologicheskoy situatsii i zon ekologicheskogo bedstviya* [Criteria for assessing the ecological environment areas to identify areas of ecological emergency and ecological disaster zones]. Appendix 1, approved MNR RF 30.11.1992. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90799/37197b6e9878843ed021523902152b55a3767c1c/ (accessed 19 March 2018).
39. Novikova L.N., Novikov Y.A. Geochemical classification of Crimean landscapes and their technogenic pollution. *Uchenye zapiski Krymskog ofederalnogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*, 2008, vol. 21, no. 3, pp. 231–237. In Rus.
40. Gosudarstvennyiy doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2015 godu» [The state report. About state and protection of the environmental in Russian Federation in 2015]. Moscow, Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Russian Federation; NIA-Priroda, 2016. 639 p.

Received: 10 November 2018.

Information about the authors

Elena V. Evstafeva, Dr. Sc., professor, Head of the Normal physiology department, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Medical Academy Named after S.I. Georgievsky.

Anna M. Bogdanova, junior researcher, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Medical Academy Named after S.I. Georgievsky.

Tatiana S. Bolshunova, Cand. Sc., engineer, Tomsk Oil and Gas Research and Design Institute.

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

Nina A. Osipova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.276

ФИЛЬТРАЦИЯ ЖИДКОСТЕЙ В АНОМАЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ

Грачев Сергей Иванович¹,
grachevsi@mail.ru

Коротенко Валентин Алексеевич¹,
grachevsi@mail.ru

Кушакова Нелли Петровна¹,
kushakovanp@tyuiu.ru

Кряквин Александр Борисович¹,
grachevsi@mail.ru

Зотова Ольга Павловна¹,
zotovaop@tsogu.ru

¹ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки эксплуатационных объектов юрских и ачимовских отложений с низкими фильтрационными свойствами и залежей вязкопластичной нефти. Для исследования фильтрации флюидов в указанных коллекторах нельзя применять классический закон Дарси. Поэтому для прогнозирования технологических показателей разработки и расчёта добычных возможностей скважин следует учитывать возникающие особенности процессов фильтрации и вытеснения нефти.

Цель: установление связи между параметром Лагранжа и начальным градиентом давления; определение значений параметра Лагранжа при нарушении пределов применимости закона Дарси; обоснование применения методов гидродинамического моделирования, разработанных для описания фильтрационных процессов вязкопластичной жидкости, к изучению движения флюидов в низкопроницаемых коллекторах.

Объекты: высокопроницаемые коллектора, насыщенные высоковязкой (вязкопластичной) нефтью; низкопроницаемые пласты ачимовских и юрских отложений.

Методы: интерпретация результатов лабораторных исследований керна; физическое моделирование фильтрационных процессов флюидов в аномальных коллекторах.

Результаты. Отклонение от закона Дарси при фильтрации жидкостей в аномальных коллекторах определяется посредством вычисления значений параметра Лагранжа. Предложен способ определения нижней границы применимости закона Дарси, при нарушении которого для описания предлагаются две модели: с начальным градиентом давления и нелинейная модель. Для процессов фильтрации с нарушением верхнего предела применимости закона Дарси рассмотрена нелинейная модель. Приведены примеры определения параметра Лагранжа для случаев нарушения нижней и верхней границ закона Дарси. Для описания процессов фильтрации дилатантных и псевдопластических жидкостей вместо нелинейных уравнений предлагается использовать систему уравнений пьезопроводности. Показано, что методы решения гидродинамических задач фильтрации и вытеснения нефти, установленные для вязкопластичных нефтей, применимы и для низкопроницаемых коллекторов.

Ключевые слова:

Аномальные коллектора, пределы применимости закона Дарси, начальный градиент давления, коэффициент подвижности, параметр Лагранжа.

Введение

Под аномальными, или нетрадиционными, коллекторами будем понимать пласты, фильтрация в которых не подчиняется классическому закону Дарси. К ним относятся высокопроницаемые отложения, насыщенные высоковязкой нефтью (ВВН) а также пласты, насыщенные маловязкой нефтью, но обладающие низкими фильтрационными свойствами. Вопросам установления верхнего и нижнего пределов применимости закона Дарси посвящено большое количество исследований как у нас в стране [1–19], так и за рубежом [20–37]. Отклонения от верхнего и нижнего пределов фильтрации применимости закона Дарси определяются числом Рейнольдса, параметром Дарси, введенного В.Н. Щелкачевым, параметром Лагранжа. Пре-

вышение верхнего предела Дарси имеет место в высокопроницаемых коллекторах. При высоких значениях коэффициента проницаемости, что соответствует большим диаметрам поровых каналов, количество частиц жидкости, взаимодействующих со стенками поровых высокопроницаемых каналов, гораздо меньше, чем количество частиц флюида, участвующих в фильтрации. Уравнение движения (нелинейный закон Дарси), описывающее фильтрацию, содержит слагаемое, зависящее от квадрата скорости фильтрации.

Для анализа процессов фильтрации ВВН А.Т. Горбуновым [1] использован коэффициент подвижности. А.Х. Мирзаджанзаде [2] предложил при исследовании фильтрации вязкопластичных нефтей (ВПН) учитывать начальное касательное

напряжение, широко используемое при решении задач подземной гидродинамики, которое в дальнейших работах А.Х. Мирзаджанзаде и других авторов было заменено начальным градиентом давления, широко используемое при решении задач подземной гидродинамики.

Определение нижней границы применимости закона Дарси

В настоящей работе предложен способ определения нижней границы применимости закона Дарси и рассмотрены особенности фильтрации флюидов в аномальных коллекторах.

Для определения нижней границы применимости закона Дарси авторами предлагается воспользоваться коэффициентом подвижности k/μ , где k – коэффициент проницаемости; μ – коэффициент динамической вязкости. Для расчетов использовались данные исследований по подсчёту запасов месторождений Тюменской области (Ершовое, Хохряковское, Русское и другие), проведённых в ЗапСибНИГНИ при участии авторов настоящей статьи. Результаты расчётов коэффициентов подвижности для разных значений k и μ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Определение нижней границы применимости закона Дарси

Table 1. Definition of a lower limit of applicability of Darcy's law

k , мД mD	μ , мПа·с mPa·s	k/μ , мД/мПа·с mD/mPa·s	Закон Дарси Darcy's law	Тип коллектора Collector type
100	5	20	классический classical	обычный normal
200	4	50		
20	2	10		
10	1	10		
10	2	5	обобщенный generalized	аномальный, низкопроницаемый anomalous, low-permeability
5	1	5		
4	1	4		
200	200	1		
500	300	1,67		аномальный, с ВПН anomalous, viscoplastic oil

В первых четырех строках приведены значения коэффициентов подвижности для обычных коллекторов, в которых процессы фильтрации подчиняются закону Дарси. В строках 5–7 рассчитан коэффициент подвижности низкопроницаемых коллекторов маловязкой нефти. В последних строках приведены значения коэффициентов подвижности для коллекторов с ВПН. Для аномальных коллекторов значения коэффициента подвижности ≤ 10 мД/мПа·с. Потому величину коэффициента подвижности, равную 10 мД/мПа·с = 10^{-11} мкм²/Па·с предлагается принять в качестве нижнего предела применимости закона Дарси.

Заметим, что, как и в каждой классификации, посвященной определению особенностей строения физического (природного) объекта, численные параметры – вещь весьма условная. Дальнейшие экспериментальные исследования могут изменить

выбранную границу. Так, для оценки значений коэффициента подвижности следует учитывать состав и структуру нефтей, строение и литологию коллектора. Поэтому если учитывать, что состав нефти изменяется в процессе разработки и литологические особенности строения коллектора, то в общем случае нижний предел применимости закона Дарси будет функцией нескольких переменных.

Зависимость между параметром Лагранжа и начальным градиентом давления

В монографии А.П. Телкова, С.И. Грачева [13] отклонение от классического закона Дарси предлагается учитывать параметром Лагранжа λ^* , зависящим от числа Рейнольдса Re и параметров пористой среды. Скорость фильтрации в этом случае равна

$$v = \frac{1}{\lambda^* (Re)} \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (1)$$

где $\partial p / \partial x$ – градиент давления.

При $\lambda^* = 1$ выполняется закон Дарси, при величине $\lambda^* > 1$ нарушается нижний предел применимости закона Дарси, если $\lambda^* < 1$ нарушается верхний предел применимости закона Дарси. Заметим, что формула (1) выполняется для постоянного коэффициента подвижности. Если скорость фильтрации постоянна, что имеет место при обработке лабораторных экспериментов, то после интегрирования (1) получим, что параметр Лагранжа является обратной величиной параметра Дарси

$$\lambda^* = \frac{k \Delta p}{\mu v l} = \frac{k F \Delta p}{\mu Q l} = \frac{1}{D a}.$$

Здесь v – скорость фильтрации; l – линейный размер образца или граница области прямолинейно-параллельной фильтрации; Q – дебит или расход; F – площадь фильтрации; Δp – перепад давления.

Чтобы применить параметр Лагранжа для анализа промысловых данных обобщим методику определения нарушения закона Дарси, рассмотренную в [13], для стационарной плоскорадиальной фильтрации. Выразим скорость фильтрации через дебит, по аналогии с (1)

$$v = \frac{Q}{2\pi r h} = \frac{k}{\lambda^* \mu} \frac{\partial p}{\partial r}. \quad (2)$$

После интегрирования получим выражение, аналогичное формуле Дюпюи

$$Q = \frac{2\pi k h \Delta p}{\mu \lambda^* \ln \frac{R}{r_c}}. \quad (3)$$

Здесь h – толщина пласта; R – радиус контура питания; r_c – радиус скважины.

Из (3) следует, что при параметре Лагранжа λ^* отличного от 1 имеет место нарушение закона Дарси. Зависимость Q от Δp изображена на рис. 1.

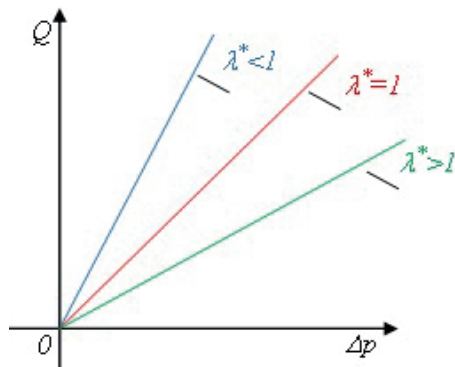


Рис. 1. Зависимость дебита от депрессии для различных значений параметра Лагранжа λ^*

Fig. 1. Flow rate dependence on depression for various values of the parameter of Lagrange λ^*

При одной и той же депрессии для $\lambda^* > 1$ получим меньший дебит, а для $\lambda^* < 1$ дебит больше, чем при выполнении закона Дарси. В общем случае линии рис. 1, соответствующие $\lambda^* > 1$ и $\lambda^* < 1$, не являются прямыми линиями.

Установим связь между параметром Лагранжа и начальным градиентом давления. Скорость фильтрации подчиняется обобщенному закону Дарси:

$$\bar{v} = -\frac{k}{\mu}(\text{grad } p - \bar{g}), \quad (4)$$

где $\bar{g}$ – начальный градиент давления, $\text{grad } p$ – текущий градиент давления. При $\text{grad } p \leq \bar{g}$ скорость фильтрации $v=0$. Если $\bar{g}=0$, то выполняется классический закон Дарси.

Для установления связи между начальным градиентом давления и параметром Лагранжа проинтегрируем уравнение пьезопроводности стационарной фильтрации для обобщенного закона Дарси (4)

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\partial}{\partial r} r \left(\frac{\partial p}{\partial r} - \bar{g} \right) \right] = 0.$$

Дебит скважины в этом случае

$$Q = \frac{2\pi kh}{\mu} \frac{(\Delta p - \Delta p^*)}{\ln \frac{R}{r_c}}, \quad \Delta p > \Delta p^*. \quad (5)$$

Приравнявая (3) и (5), получим

$$\lambda^* = \frac{1}{1 - \frac{\Delta p^*}{\Delta p}} > 1. \quad (6)$$

Способ определения начального градиента давления для ВПН на установившихся режимах фильтрации предложен в работах авторов [12, 38].

$$g = \frac{\Delta p^*}{R - r_c - r_c \ln \frac{R}{r_c}}, \quad (7)$$

здесь Δp^* – предельное значение депрессии, соответствующее началу фильтрации; R – радиус кон-

тура питания; r_c – радиус скважины. Формулы (6) и (7) устанавливают связь между начальным градиентом давления и параметром Лагранжа.

Таким образом, нарушение нижней границы фильтрации закона Дарси можно определить по результатам интерпретации индикаторных диаграмм.

Уравнения пьезопроводности при нарушении применимости закона Дарси

Нарушение закона Дарси имеет место не только при фильтрации ВПН и маловязких флюидов в низкопроницаемых коллекторах, но и при течении флюидов с особыми структурно-механическими свойствами в коллекторах большой проницаемости. По результатам лабораторных исследований реологических свойств жидкостей, обладающих особыми структурно-механическими свойствами, выделены три группы: вязкопластические (вязкопластичные) нефти, псевдопластичные флюиды (псевдопластики) и дилатантные жидкости. К последним относятся: водные растворы полимеров (например, полиакриломида), а также жидкости, применяемые для выравнивания профиля притока. На рис. 2 изображены зависимости касательных напряжений от скорости деформации сдвига [4].

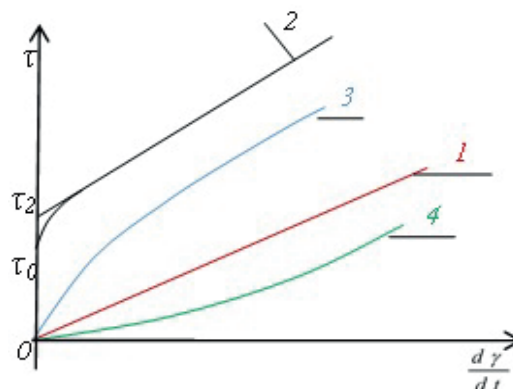


Рис. 2. Зависимость касательных напряжений от скоростей деформации сдвига высоковязких нефтей. 1 – ньютоновская жидкость; 2 – вязкопластическая жидкость (ВПЖ); 3 – псевдопластики; 4 – дилатантная жидкость; τ – напряжение сдвига; $\frac{d\gamma}{dt}$ – скорость деформации сдвига; τ_0 – начальное касательное напряжение для ВПЖ; τ_2 – приближенное значение начального касательного напряжения для ВПЖ

Fig. 2. Dependence of shear stresses on shear strain rates of high-viscosity oils. 1 – newtonian fluid; 2 – viscoplastic fluid; 3 – pseudoplastic; 4 – dilatant fluid; τ – shear stress; $\frac{d\gamma}{dt}$ – the rate of shear strain; τ_0 – the initial shear stress for viscoplastic fluid; τ_2 – the approximate value of the initial shear stress for viscoplastic fluid

Заметим, что время построения реологических кривых, как правило, не приводится. Из рисунка следует, что начальный период отклонения кривых 2–4 от аппроксимирующих прямых небольшой.

Известно, что для решения задач прогнозирования процессов фильтрации и выбора режимов

эксплуатации скважин используются скорости фильтрации и градиенты давления. Ю.П. Желтовым в [5] приведена графическая зависимость скорости фильтрации дилатантной жидкости от градиента давления (рис. 3, б, кривая 4). Скорость деформации сдвига соответствует скорости фильтрации, касательное напряжение – градиенту давления. Зависимость скорости фильтрации от градиента давления для дилатантной жидкости нелинейная.

$$\bar{v} = -\frac{k}{\mu}(|grad p|)^n = -\frac{k}{\mu R} grad p, \quad n < 1, \quad (8)$$

где n – безразмерный параметр; R – фактор сопротивления.

Сравнив (2) и (8), получим, что фактор сопротивления равен параметру Лагранжа.

По аналогии построим зависимости для ВПН, дилатантной жидкости и псевдопластиков в координатах градиент давления – скорость фильтрации (рис. 3).

Точки A_2 , A_3 и A_4 соответствуют границам кривых 2–4, отделяющим малые значения текущих градиентов давления от больших значений текущих градиентов давления.

Аналитическая зависимость скорости фильтрации от градиента давления для псевдопластической жидкости аналогична (8), но безразмерный параметр $n > 1$.

Для определения распределения давления псевдопластической и дилатантной жидкостей в зоне возмущения работающих скважин необходимо записать уравнение пьезопроводности В.Н. Щелкачева. Для этого следует подставить (8) в уравнение неразрывности (9)

$$\frac{\partial}{\partial t}(m\rho) + \text{div}(\rho v) = 0, \quad (9)$$

где m – коэффициент пористости; ρ – плотность флюида.

С учётом сжимаемости флюида и коллектора получим нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных относительно давления. Решение подобных уравнений вызывает определенные трудности. Для их устранения воспользуемся тем, что время работы эксплуатационных скважин измеряется сутками, месяцами. Отметим, что наибольшие текущие градиенты давления имеют место в призабойной зоне пласта (ПЗП), причем наибольшие значения градиентов давления конечны и не могут превышать величин, ведущих к разрушению коллектора. Области, где скорости фильтрации имеют малую величину, соответствуют удаленным зонам в окрестностях радиуса контура питания. Поэтому, исходя из физических соображений, предлагается нелинейные зависимости скоростей фильтрации от градиентов давления разбить на два участка, которые соответствуют ПЗП и удаленным зонам фильтрации. На рис. 3 пунктирными линиями изображены границы участков; параметры g_3 , g_4 соответствуют начальным градиентам давлений для дилатантной и псевдопластической жидкостей. На первом участке, с большими градиентами давления (в том числе и в ПЗП), выполняется обобщенный закон Дарси (4). Классический закон Дарси для дилатантных и псевдопластиков, $g=0$, имеет место для удаленных зон, близких к контуру питания. А.Т. Горбуновым [1] отмечается, что в силу неоднородности коллектора в начале эксплуатации при малых градиентах давлений начинают работать прослой с более высокой проницаемостью, где влияние начального градиента g незначительно. В процессе эксплуатации в работу подключаются прослой с меньшей проницаемостью, фильтрация в которых осуществляется по обобщенному закону Дарси (4).

После подстановки (4) в (9) уравнение пьезопроводности на первом участке для больших градиентов давления имеет вид:

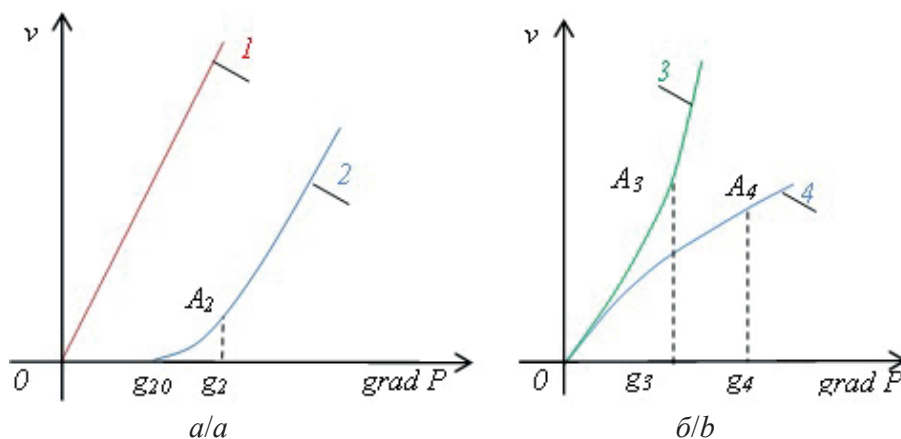


Рис. 3. Зависимости скоростей фильтрации от градиентов давления высоковязких жидкостей: а) g_{20} , g_2 – начальные градиенты давлений для ВПЖ, прямая линия 1 соответствует закону Дарси; кривая 2 – обобщенному закону Дарси; б) g_{30} , g_4 – начальные градиенты давлений для псевдопластиков (кривая 3) и дилатантной жидкости (кривая 4)

Fig. 3. Dependences of filtration rates on pressure gradients of high-viscosity liquids: а) g_{20} , g_2 – initial pressure gradients for viscoplastic fluid, straight line 1 corresponds to the Darcy law; curve 2 – generalized Darcy law; б) g_{30} , g_4 – initial pressure gradients for pseudoplastic (curve 3) and dilatant fluid (curve 4)

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi \operatorname{div}(\operatorname{grad} p - g), \quad (10)$$

а на втором участке для малых градиентов давления

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi \operatorname{div}(\operatorname{grad} p), \quad (11)$$

где χ – коэффициент пьезопроводности.

Таким образом, используя результаты обработки гидродинамических исследований скважин на установившихся режимах, а при их отсутствии по лабораторным данным, можно определить начальные градиенты давления g для дилатантных и псевдопластических жидкостей. Сшиванием решений уравнений (10) и (11) можно определить текущие границы участков 1 и 2.

Оценка верхнего предела применимости закона Дарси

Вернемся к оценке верхнего предела применимости закона Дарси. Параметр Лагранжа в этом случае $\lambda^* < 1$. Из (3) следует, что коэффициент продуктивности η^* (12) в этом случае превышает величину коэффициента продуктивности η , соответствующего закону Дарси, и равен

$$\eta^* = \frac{Q}{\Delta p} = \frac{2\pi kh}{\mu \lambda^*} \frac{1}{\ln \frac{R}{r_c}} = \frac{\eta}{\lambda^*}. \quad (12)$$

Рассмотрим нелинейный закон Дарси для плоскорадиальной фильтрации в виде

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu(p)}{k} v - \frac{\rho(p)}{l} v^2, \quad (13)$$

где $\rho(p)$ – плотность флюида; l – характерный параметр пористой среды (коэффициент макрошероховатости). Первое слагаемое правой части учитывает вязкостные силы, второе – инерционные. Если скорости фильтрации малы, то выполняется классический закон Дарси.

Плотность и вязкость флюида являются функциями давления, что существенно для фильтрации газов. При фильтрации жидкостей зависимостями плотности и вязкости от давления можно пренебречь. В случае плоскорадиальной фильтрации, подставляя скорость, выраженную через дебит в (13), после интегрирования получим известную зависимость депрессии от дебита для стационарной фильтрации

$$\Delta p = A Q - B Q^2, \quad (14)$$

$$\text{где } A = \frac{\mu}{2\pi kh} \ln \frac{R}{r_c}, \quad B = \frac{\rho}{(2\pi h)^2 l} \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R} \right) \approx \frac{\rho}{(2\pi h)^2 l r_c}.$$

Параметр A обратно пропорционален коэффициенту продуктивности. Из уравнения (14) при $\Delta p = 0$ следует, что $Q = 0$. Зависимость дебита от депрессии имеет вид

$$Q = \frac{A}{2B} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4B\Delta p}{A^2}} \right). \quad (15)$$

Приравнявая (3) и (14), получим выражение для определения параметра Лагранжа λ^*

$$\lambda^* = 1 - \frac{B}{A} Q < 1. \quad (16)$$

Если параметр λ^* известен, то из (16) можно определить параметры B и l . Таким образом, установлена связь между коэффициентом макрошероховатости и параметром Лагранжа. Методика определения коэффициента макрошероховатости по результатам интерпретации гидродинамических исследований газовых скважин изложена в [39]. В литературе приводится зависимость, в которой коэффициент l прямо пропорционален корню квадратному из коэффициента проницаемости. На наш взгляд такая зависимость не соответствует физической природе явления. Действительно, с увеличением проницаемости параметр l возрастает, коэффициент B в выражении (14) убывает, следовательно, нелинейная фильтрация при больших значениях коэффициента проницаемости превращается в линейную фильтрацию.

Для определения значения параметра Лагранжа и дебита при нарушении верхнего предела применимости закона Дарси для заданной депрессии рассмотрим следующий пример.

Пример 1. Дано $\mu = 1$ мПа·с, $r_c = 0,1$ м, $R = 300$ м, $h = 8$ м, $l = 0,7 \cdot 10^{-9}$ м, $\Delta p = 3$ МПа, $k = 0,7 \cdot 10^{-12}$ м², $\rho = 700$ кг/м³.

Расчет проводится методом итераций:

- 1) по формулам находим коэффициенты A , B ;
- 2) по формуле (15) определяем дебит на первом шаге;
- 3) из формулы (16) определим λ^* ;
- 4) по параметру λ^* из (3) определяем дебит;
- 5) повторяем процедуру, начиная с пункта 3.

Повторяя итерационный процесс, сходящийся на 6-й итерации, получим $Q = 1769$ м³/сут, $\lambda^* = 0,648$. Отметим, что A и B – постоянные величины, характеризующие фильтрационные свойства коллектора и физические свойства жидкости. В табл. 2 приведен расчет дебитов, определенных по формуле (15) и по формуле Дюпюи $\lambda^* = 1$, для разных значений депрессий.

Таблица 2. Расчет дебитов для нелинейной фильтрации (15) и по формуле Дюпюи

Table 2. Calculation of flow rates for nonlinear filtering (15) and by the Dupuis formula

Δp , МПа MPa	Q , м ³ /сут m ³ /day (15)	Q , м ³ /сут, формула Дюпюи Dupuis formula, m ³ /day	λ^*
0	0	0	1,00
0,5	197	189	0,960
1	414	379	0,917
2	935	759	0,812
3	1769	1139	0,644

Среднее значение параметра Лагранжа $\lambda_c^* = 0,833$ (без первой строки).

Таким образом, с ростом депрессии для нелинейной фильтрации дебит больше, чем дебит, подсчитанный по формуле Дюпюи. Из формулы (15)

видно, что максимальный дебит соответствует депрессии

$$Q_{\max} = \frac{A}{2B}, \quad \Delta p_{\max} = \frac{A^2}{4B}. \quad (17)$$

Если текущая депрессия больше $\Delta p_{\max}$ (17), то подкоренное выражение отрицательно и формула (15) не имеет физического смысла, но (любопытно), если взять модуль подкоренного выражения, то при $\Delta p = 6,5$ МПа дебит будет равен нулю.

Если в формуле (13) второе слагаемое взять со знаком плюс:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu(p)}{k} v + \frac{\rho(p)}{l} v^2, \quad (18)$$

то уравнение (14) примет вид

$$\Delta p = AQ + BQ^2. \quad (19)$$

Дебит и параметр Лагранжа определяются соотношениями

$$Q = \frac{A}{2B} \left(\sqrt{1 + \frac{4B\Delta p}{A^2}} - 1 \right), \quad \lambda^* = 1 + \frac{B}{A} Q > 1. \quad (20)$$

Для данных рассмотренного выше примера 1 значения дебитов и параметра λ^* приведены в табл. 3.

Таблица 3. Расчет дебитов для нелинейной фильтрации (20) и по формуле Дюпюи

Table 3. Calculation of flow rates for nonlinear filtering (20) and by the Dupuis formula

Δp , МПа MPa	Q , м ³ /сут m ³ /day (20)	Q , м ³ /сут, формула Дюпюи m ³ /day, Dupuis formula	λ^*
0	0	0	1,00
1	354	379	1,07
2	669	759	1,13
3	955	1139	1,19
4	1219	1518	1,25
5	1465	1898	1,30

Из табл. 3 видно, что $\lambda^* > 1$ и дебит, подсчитанный по формуле Дюпюи, больше дебита, определенного по формуле (20). Среднее значение $\lambda_c^* = 1,213$. Таким образом, уравнение (19) соответствует фильтрации флюида при нарушении нижнего предела применимости закона Дарси. Поэтому в левой части уравнения (19) следует учитывать предельное значение депрессии Δp^* . В результате получим

$$\Delta p - \Delta p^* = AQ + BQ^2. \quad (21)$$

При $\Delta p = \Delta p^*$ дебит $Q = 0$. Величину Δp^* можно определить по результатам обработки индикаторных диаграмм [38]. Заметим, что параметры в табл. 3 рассчитывались по данным примера 1 для большой проницаемости и маловязкой нефти. И тем не менее имеет место нарушение нижнего предела применимости закона Дарси. Действительно, из (3) и (21) имеем

$$\lambda^* = 1 + \frac{B}{A} Q + \frac{\Delta p^*}{AQ} > 1. \quad (22)$$

Таким образом, для описания стационарной фильтрации с нарушением нижнего предела применимости закона Дарси можно использовать две модели: 1) линейная – с учетом начального градиента давления, уравнения (5), (10); 2) нелинейная – уравнения (21), (22). Для иллюстрации рассмотрим низкопроницаемый коллектор со следующими данными, пример 2.

Пример 2. Дано $\mu = 1$ мПа·с, $r_c = 0,1$ м, $R = 100$ м, $h = 8$ м, $l = 0,7 \cdot 10^{-9}$ м, $k = 7$ мД, $\rho = 700$ кг/м³, $\Delta p^* = 0,1$ МПа.

В табл. 4 приведены результаты расчета дебитов по формулам (5) и (19), а также параметров Лагранжа по формулам (6), (20), в которой Δp заменено на $(\Delta p - \Delta p^*)$, и (22).

Таблица 4. Расчет дебитов и параметров Лагранжа для ВПН (5), (6) и для нелинейной фильтрации (18), (20), (22)

Table 4. Calculation of the rates and Lagrange parameters for viscoplastic fluid (5), (7) and for nonlinear filtration (18), (20), (22)

Δp , МПа/МПа	Q , м ³ /сут m ³ /day (5)	$\lambda^*(6)$	Q , м ³ /сут m ³ /day (20)	$\lambda^*(20)$	$\lambda^*(22)$
0	0	1	0	1	1
1	4	1,111	4	1,00001	1,10001
2	8	1,053	9	1,00002	1,05002
3	13	1,034	13	1,00003	1,03337
4	17	1,025	18	1,00004	1,02504
5	22	1,020	22	1,00005	1,02005
6	26	1,017	26	1,00006	1,01673

Дебиты, рассчитанные по формулам (5) и (20), практически совпадают. Параметр Лагранжа ведет себя по-разному. Для ВПН (6) и нелинейной фильтрации с учетом Δp^* , формула (22), λ^* убывает с ростом давления. Если $\Delta p^* = 0$ (20), то λ^* возрастает. Причем $\lambda^* > 1$, что свидетельствует о нарушении нижнего предела применимости закона Дарси. Если параметр $\lambda^* = 1$, то дебит, подсчитанный по формуле Дюпюи, незначительно, но превышает дебиты, приведенные в таблице.

Уравнение (18) соответствует нелинейной стационарной фильтрации. Если решение уравнения (18) подставить в уравнение неразрывности, то получим нелинейное дифференциальное уравнение для определения давления при нестационарной фильтрации, решение которого, как уже ранее говорилось, вызывает определенные трудности. В связи с этим для вывода уравнения пьезопроводности, учитывающего особенности фильтрации в аномальных коллекторах, подставим скорость фильтрации (2) в уравнение неразрывности (9). В результате получим

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi \operatorname{div} \left(\frac{1}{\lambda^*} \operatorname{grad} p \right) \approx \frac{\chi}{\lambda_c^*} \operatorname{div} \operatorname{grad} p = \chi_c \operatorname{div} \operatorname{grad} p. \quad (23)$$

Здесь λ_c^* – среднее значение параметра Лагранжа, определяемое из табл. 1, 2; $\chi_n = \frac{\chi}{\lambda_n^*}$ – коэффициент пьезопроводности аномального коллектора. При $\lambda^* > 1$ соответствует нарушению нижнего предела применимости закона Дарси, $\lambda^* < 1$ соответствует нарушению верхнего предела применимости закона Дарси.

Отметим, что уравнение (23) можно разбить на два уравнения: для малых градиентов давления в удаленных зонах пласта и для больших градиентов в зоне ПЗП. Для каждого уравнения выбрать свое λ^* , затем решения «сшить».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбунов А.Т. Разработка аномальных нефтяных месторождений. – М.: Недра, 1981. – 237 с.
2. Огибалов П.М., Мирзаджанзаде А.Х. Нестационарные движения вязкопластичных сред. – М.: МГУ, 1977. – 372 с.
3. О возможном влиянии начального градиента на разработку многопластовых газовых и газоконденсатных месторождений при водонапорном режиме / А.Х. Мирзаджанзаде, Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, Ю.В. Желтов, Г.Д. Маргулов, Г.В. Рассохин, В.М. Рыжик // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1970. – № 1. – С. 39–45.
4. Гиматутдинов Ш.К., Ширковский А.И. Физика нефтяного и газового пласта. – М.: Изд-во «Недра», 1982. – 311 с.
5. Желтов Ю.П. Разработка нефтяных месторождений. – М.: ОАО «Недра», 1998. – 365 с.
6. Физические модели вытеснения вязкопластичных нефтей / В.А. Коротенко, С.И. Грачев, Н.П. Кушакова, Р.Р. Сабитов // Нефтепромысловое дело. – 2014. – № 5. – С. 5–10.
7. Особенности вытеснения вязкопластичной нефти водой / В.А. Коротенко, Н.П. Кушакова, И.В. Сидоров, Р.Р. Сабитов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2013. – № 5. – С. 190–196.
8. Медведский Р.И., Севастьянов А.А. Оценка извлекаемых запасов нефти и прогноз уровней добычи по промысловым данным. – СПб.: Недра, 2004. – 192 с.
9. Севастьянов А.А., Карнаухова К.Н., Коровин К.В. Обоснование технологических решений для повышения эффективности разработки запасов нефти // Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании: Труды II Международной науч.-тех. конференции. – Тюмень, 2006. – С. 178–182.
10. Development of ultra low permeability reservoirs / I.S. Afanasev, V.A. Baikov, A.V. Kolonskikh, A.I. Fedorov, V.V. Maltsev // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 5. – С. 82–86.
11. Алишаев М.Г., Розенберг М.Д., Теслюк Е.В. Неизотермическая фильтрация при разработке нефтяных месторождений. – М.: Недра, 1985. – 275 с.
12. Модели фильтрации вязкопластических флюидов и критические (начальные) градиенты давления // А.К. Ягафаров, Н.П. Кушакова, В.А. Коротенко, А.Н. Сумин // Наука и ТЭК. – 2012. – № 5. – С. 18–20.
13. Телков А.П., Грачев С.И. Гидромеханика пласта применительно к прикладным задачам разработки нефтяных и газовых месторождений. В 2 ч. Ч. 1. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2009. – 240 с.
14. К вопросу о вытеснении нефти из аномальных коллекторов / С.И. Грачев, В.А. Коротенко, Н.П. Кушакова, О.П. Зотова // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 10. – С. 114–118.
15. Шпильман А.В., Коровин К.В., Савранская М.П. Перспективы освоения ТРИЗ В ХМАО-ЮГРЕ // НЕФТЬГАЗТЭК: Труды

Заключение

Установлен критерий применимости закона Дарси для исследований процессов фильтрации и вытеснения нефти водой (табл. 1) при значениях параметра Лагранжа более единицы. Для описания фильтрации флюидов в аномальных коллекторах следует рассматривать две модели: линейную – с учетом начального градиента давления, уравнения (5), (10); и нелинейную – уравнение (21). Выбор оптимальной модели осуществляется посредством сравнения фактических промысловых и расчетных значений, с учетом имеющихся результатов гидродинамических и лабораторных исследований.

- 6 Тюменского международного инновационного форума. – Тюмень, 2015. – С. 461–464.
16. Севастьянов А.А., Коровин К.В., Карнаухова А.Н. Выявление особенностей механизма выработки запасов нефти по месторождениям Ханты-Мансийского автономного округа // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2007. – № 3. – С. 32–38.
17. Брехунцов А.М., Телков А.П., Федорцов В.К. Развитие теории фильтрации жидкости и газа к горизонтальным стволам скважин. – Тюмень: ОАО «СибНАЦ», 2004. – 290 с.
18. Телков А.П. Особенности разработки нефтегазовых месторождений. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2001. – 482 с.
19. Revisiting the development of oil deposits with low permeability reservoirs / S.N. Zakirov, A.A. Barenbaum, E.S. Zakirov, I.M. Indrupskiy, V.A. Serebryakov, D.S. Klimov // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – № 42. – P. 104219. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i42/104219, November 2016.
20. Effect of chemical additives on dynamic capillary pressure during waterflooding in low permeability reservoirs / H. Li, Y. Li, K. Wang, H. Luo, S. Chen, J. Guo // Energy and Fuels. – 2016. – № 9. – P. 7082–7093.
21. Effect of quadratic pressure gradient term on a one-dimensional moving boundary problem based on modified Darcy's law / W. Liu, Y. Liu, J. Yao, Z. Chen // Acta Mechanica Sinica. – 2016. – № 1. – P. 38–53.
22. Cao Y., Yuan G., Xi K. Preliminary discussion of improvement experiments on strong sensitivity-low permeability // Xinan Shiyou Daxue Xuebao. – 2012. – № 1. – P. 90–96.
23. A new method for testing relative permeability of ultra-low permeability reservoirs / Z. Yang, Z. Li, X. Wang, W. Shan // Shiyou Xuebao. – 2010. – № 4. – P. 629–632.
24. Nonlinear flow numerical simulation of an ultra-low permeability reservoir / R.-Z. Yu, Z.-M. Yang, Q. Lei, Y.-N. Bian // Chinese Physics Letters. – 2010. – № 7. – P. 074702.
25. Dynamic effect of capillary pressure in low permeability reservoirs / S. Tian, G. Lei, S. He, L. Yang // Petroleum Exploration and Development. – 2012. – № 3. – P. 405–411.
26. Dynamic effect of capillary pressure in low permeability reservoirs / S. Tian, G. Lei, S. He, L. Yang // Shiyou Kantan Yu Kaifa. – 2012. – № 3. – P. 378–384.
27. He J.G., Song K.P., Yang J. Study on experiment of advance water injection an example from low permeability oil reservoir of Fuyu oil reservoir in an oil field // Science Technology and Engineering. – 2014. – V. 14 (11). – P. 181–183.
28. Hu Z.M., Ba Z.B., Xiong W. Analysis of micro-pore structure in low permeability reservoirs // Journal of A Petroleum Institute. – 2006. – V. 30 (3). – P. 51–53.
29. Wang W., Peng H., Li S. Opening mechanism of dynamic fractures caused by water injection and effective adjustment in low per-

- meability reservoirs, Daqing oilfield in Songliao basin // Oil & gas geology. – 2015. – V. 36 (5). – P. 842–847.
30. Vishnudas R., Chaudhuri A. A comprehensive numerical study of immiscible and miscible viscous fingers during chemical enhanced oil recovery // Fuel. – 2016. – V. 194. – P. 480–490.
31. Loh W.L., Premanadhan V.K. Experimental investigation of viscous oil-water flows in pipeline // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2016. – V. 147. – P. 89–97.
32. Investigation on flow patterns and pressure drops of highly viscous crude oil-water flows in a horizontal pipe / J. Jiaqiang, S. Jie, T. Jiatong, H. Min, X. Tao // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2016. – V. 72. – P. 88–96.
33. Maheswaran R., Sunil J. Effect of nano sized garnet particles dispersion on the viscous behavior of extreme pressure lubricant oil // Journal of Molecular Liquids. – 2016. – 223. – P. 643–651.
34. Transport and removal of a solvent in porous media in the presence of bitumen, a highly viscous solute / S. Panda, K. Pal, S. Merzara, M.R. Gray, P. Choi // Chemical Engineering Science. – 2017. – V. 165. – P. 229–239.
35. Hydrodynamic study of multiphase flow transport of highly viscous foamy fluids / A. Brito, R. Cabello, N. Guzman, L. Marcano, J. Trujillo // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2015. – V. 135. – P. 367–374.
36. Dong T., Cao S., Xu G. Highly porous oil sorbent based on hollow fibers as the interceptor for oil on static and running water // Journal of Hazardous Materials. – 2015. – V. 305. – P. 1–7.
37. Arabloo M., Shokrollahi A., Ghazanfari M.H., Rashtchian D. Characterization of viscous fingering during displacements of low tension natural surfactant in fractured multi-layered heavy oil systems // Chemical Engineering Research and Design. – 2015. – V. 72. – P. 23–34.
38. Коротенко В.А., Ягафаров А.К., Сумин А.Н. Определение начального градиента давления по результатам гидродинамических исследований скважин // Известия вузов: Нефть и газ. – 2012. – № 6. – С. 55–58.
39. Пространственная фильтрация и прикладные задачи разработки нефтегазоконденсатных месторождений и нефтегазодобычи / А.П. Телков, С.И. Грачев, Е.И. Гаврилов, Т.Л. Краснова. – Тюмень: ОО НИПИКБС-Т, 2001. – 460 с.

Поступила 15.11.2018 г.

Информация об авторах

Грачев С.И., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.

Коротенко В.А., кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.

Кушакова Н.П., кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта, строительных и дорожных машин Строительного института Тюменского индустриального университета.

Кряквин А.Б., кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.

Зотова О.П., ассистент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.

UDC 622.276

LIQUID FILTRATION IN ANOMALOUS COLLECTORS

Sergey I. Grachev¹,
grachevsi@mail.ru

Valentin A. Korotenko¹,
grachevsi@mail.ru

Nelli P. Kushakova¹,
kushakovnp@tyuiu.ru

Aleksandr B. Kryakvin¹,
grachevsi@mail.ru

Olga P. Zotova¹,
zotovaop@tsogu.ru

¹ Tyumen Industrial University,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

The relevance of the research is caused by the need of development of Jurassic and Achimov reservoirs with low filtration properties and viscoplastic oil deposits. Classic Darcy law can not be applied to these reservoirs. So to predict development indicators and to calculate well production potential the filtration and oil displacement features should be considered.

The main aim of the research is to find the relation between Lagrange parameter and initial pressure gradient, to identify values of Lagrange parameter when Darcy law can not be applied. The aim of the research is to explain as well the hydrodynamic modeling methods (developed for liquid filtration) application to research of fluid flow in anomalous reservoirs.

Objects: high-permeability reservoirs with high-viscosity (viscoplastic) oil; low-permeability Jurassic and Achim layers.

Methods: interpretation of laboratory core researches; physical modeling of fluid filtration in anomalous reservoirs.

Results. The deviation from Darcy law for liquid filtration in anomalous reservoirs is defined by Lagrange parameter calculation. Method of determination of lower limit of Darcy Law applicability is proposed. For the case of Darcy Law violation two models are proposed: with initial pressure gradient and nonlinear model. Nonlinear model is considered for the case of upper limit of Darcy law violation. Lagrange parameter calculation examples are considered for upper and lower limits of Darcy's Law violation. It is proposed to use system of piezoconductivity equations instead of nonlinear equations for dilatant and pseudoplastic fluids filtration. It is shown that methods for solving hydrodynamic filtration and oil displacement problems are applicable to both viscoplastic oils and low-permeability reservoirs.

Key words:

Anomalous collectors, limits of applicability of the Darcy law, initial pressure gradient, mobility coefficient, Lagrange parameter.

REFERENCES

1. Gorbunov A.T. *Razrabotka anomalnykh neftyanykh mestorozhdeniy* [Development of anomalous oil deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 237 p.
2. Ogibalov P.M., Mirzadzhanzade A.H. *Nestatsionarnye dvizheniya vyazkoplastichnykh sred* [Nonstationary motions of viscoplastic media]. Moscow, MGU Publ., 1977. 372 p.
3. Mirzadzhanzade A.H., Barenblatt G.I., Entov V.M., Zheltov Yu.V., Margulov G.D., Rassokhin G.V., Ryzhik V.M. O vozmozhnom vliyani nachalnogo gradienta na razrabotku mnogoplazstovykh gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniy pri vodonapornom rezhime [On possible influence of the initial gradient on development of multi-layer gas and gas-condensate fields in the water-pressure regime]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft i gaz*, 1970, no. 1, pp. 39–45.
4. Gimatutdinov S.K., Shirkovskiy A.I. *Fizika neftyanogo i gazovogo plasta* [Physics of oil and gas reservoir]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 311 p.
5. Zheltov I.P. *Razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy* [Development of oil fields]. Moscow, Nedra Publ., 1998. 365 p.
6. Korotenko V.A., Grachev S.I., Kushakova N.P., Sabitov R.R. Fizicheskie modeli vytesneniya vyazkoplastichnykh neftey [Physical models of viscous-plastic oils displacement]. *Neftepromyslovoye delo*, 2014, no. 5, pp. 5–10.
7. Korotenko V.A., Kushakova N.P., Sidorov I.V., Sabitov R.R. Features of viscoplastic oil replacement by water. *Elektronnyi nauchnyy zhurnal «Neftegazovoye delo»*, 2013, no. 5, pp. 190–196. In Rus.
8. Medvedskiy R.I., Sevastyanov A.A. *Otsenka izvlekaemykh zapasov nefti i prognoz urovney dobychi po promyslovym dannym* [Estimation of recoverable oil reserves and forecast of production levels from field data]. St-Petersburg, Nedra Publ., 2004. 192 p.
9. Sevastyanov A.A., Karnaukhov K.N., Korovin K.V. Obosnovanie tekhnologicheskikh resheniy dlya povysheniya effektivnosti vy-rabotki zapasov nefti [Substantiation of technological solutions for increasing the efficiency of producing oil reserves]. *Trudy II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnikeskoy konferentsii. Novye informatsionnye tekhnologii v neftegazovoy otrasli i obrazovanii* [Proc. 2 Int. scientific-tech. conf. New Information Technologies in the Oil and Gas Industry and Education]. Tyumen, 2006. pp. 178–182.
10. Afanasiev I.S., Baikov V.A., Kolonskikh A.V., Fedorov A.I., Maltsev V.V. Development of ultra low-permeability oil reservoirs. *Oil industry*, 2014, no. 5, pp. 82–86. In Rus.
11. Alishaev M.G., Rozenberg M.D., Teslyuk E.V. *Neizotermicheskaya filtratsiya pri razrabotke neftyanykh mestorozhdeniy* [Non-isothermal filtration in development of oil fields]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 275 p.

12. Yagafarov A.K., Kushakova N.P., Korotenko V.A., Sumin A.N. Modeli filtratsii vyazkoplasticheskikh flyuidov i kriticheskie (nachalnye) gradienty davleniya [Models of filtration of viscoplastic fluids and critical (initial) pressure gradients]. *Nauka i TEK*, 2012, no. 5, pp. 18–20.
13. Telkov A.P., Grachev S.I. *Gidromekhanika plasta primenitelno k prikladnym zadacham razrabotki neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy* [Hydrodynamics of the reservoir in relation to application to develop oil and gas fields]. Tyumen, TyumGNGU Publ., 2009. 240 p.
14. Grachev S.I., Korotenko V.A., Kushakova N.P., Zotova O.P. The question of the displacement of oil from the anomalous collectors. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2016, no. 10, p. 114–118. In Rus.
15. Shpilman A.V., Korovin K.V., Savranskaya M.P. Perspektivy osvoeniya TRIZ V HMAO-IuGRE [Perspectives of TDF development in KhMAO-Iugra]. *Trudy 6 Tyumenskogo mezhduнародnogo innovatsionnogo foruma. NEFTGAZTEK* [Proc. 6th Tyumen Int. Innovation Forum NEFTGAZTEK.]. Tyumen, 2015. pp. 461–464.
16. Sevastyanov A.A., Korovin K.V., Karnaukhov A.N. Vyyavlenie osobennostey mekhanizma vyrabotki zapasov nefiti po mestorozhdeniyam Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga [Identification of features of the mechanism of oil reserves development in the fields of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft i gaz*, 2007, no. 3. pp. 32–38.
17. Brekhuntsov A.M., Telkov A.P., Fedortsov V.K. *Razvitie teorii filtratsii zhidkosti i gaza k gorizontalnym stvolam skvazhin* [Development of the theory of fluid and gas filtration to horizontal wellbores]. Tyumen, SibNAC Publ., 2004. 290 p.
18. Telkov A.P. *Osobennosti razrabotki neftegazovykh mestorozhdeniy* [Features of development of oil and gas fields]. Tyumen, TyumGNGU Publ., 2001. 482 p.
19. Zakirov S.N., Barenbaum A.A., Zakirov E.S., Indrupskiy I.M., Serebryakov V.A., Klimov D.S. Revisiting the development of oil deposits with low permeability reservoirs. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, no. 42, pp. 104219.
20. Li H., Li Y., Wang K., Luo H., Chen S., Guo J. Effect of chemical additives on dynamic capillary pressure during waterflooding in low permeability reservoirs. *Energy and Fuels*, 2016, no. 9, pp. 7082–7093.
21. Liu W., Liu Y., Yao J., Chen Z. Effect of quadratic pressure gradient term on a one-dimensional moving boundary problem based on modified Darcy law. *Acta Mechanica Sinica*, 2016, no. 1 (32), pp. 38–53.
22. Cao Y., Yuan G., Xi K. Preliminary discussion of improvement experiments on strong sensitivity-low permeability. *Xinan Shiyou Daxue Xuebao*, 2012, no. 1, pp. 90–96.
23. Yang Z., Li Z., Wang X., Shan W. A new method for testing relative permeability of ultra-low permeability reservoirs. *Shiyou Xuebao*, 2010, no. 4, pp. 629–632.
24. Yu R.-Z., Yang Z.-M., Lei Q., Bian Y.-N. Nonlinear flow numerical simulation of an ultra-low permeability reservoir. *Chinese Physics Letters*, 2010, no. 7, pp. 074702.
25. Tian S., Lei G., He S., Yang L. Dynamic effect of capillary pressure in low permeability reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, no. 3, pp. 405–411.
26. Tian S., Lei G., He S., Yang L. Dynamic effect of capillary pressure in low permeability reservoirs. *Shiyou Kantan Yu Kaifa*, 2012, no. 3, pp. 378–384.
27. He J.G., Song K.P., Yang J. Study on experiment of advance water injection an example from low permeability oil reservoir of Fuyu oil reservoir in an oil field. *Science Technology and Engineering*, 2014, no. 14 (11), pp. 181–183.
28. Hu Z.M., Ba Z.B., Xiong W. Analysis of micro-pore structure in low permeability reservoirs. *Journal of a Petroleum Institute*, 2006, vol. 30 (3), pp. 51–53.
29. Wang W., Peng H., Li S. Opening mechanism of dynamic fractures caused by water injection and effective adjustment in low permeability reservoirs, Daqing oilfield in Songliao basin. *Oil & gas geology*, 2015, no. 36 (5), pp. 842–847.
30. Vishnudas R., Chaudhuri A. A comprehensive numerical study of immiscible and miscible viscous fingers during chemical enhanced oil recovery. *Fuel*, 2016, no. 194, pp. 480–490.
31. Loh W.L., Premanadhan V.K. Experimental investigation of viscous oil-water flows in pipeline. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, no. 147, pp. 89–97.
32. Jiaqiang J., Jie S., Jiatong T., Min H., Tao X. Investigation on flow patterns and pressure drops of highly viscous crude oil-water flows in a horizontal pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, no. 72, p. 88–96.
33. Maheswaran R., Sunil J. Effect of nano sized garnet particles dispersion on the viscous behavior of extreme pressure lubricant oil. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, no. 223, pp. 643–651.
34. Panda S., Pal K., Merzara S., Gray M.R., Choi P. Transport and removal of a solvent in porous media in the presence of bitumen, a highly viscous solute. *Chemical Engineering Science*, 2017, no. 165, p. 229–239.
35. Brito A., Cabello R., Guzman N., Marcano L., Trujillo J. Hydrodynamic study of multiphase flow transport of highly viscous foamy fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, no. 135, p. 367–374.
36. Dong T., Cao S., Xu G. Highly porous oil sorbent based on hollow fibers as the interceptor for oil on static and running water. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, no. 305, pp. 1–7.
37. Arabloo M., Shokrollahi A., Ghazanfari M.H., Rashtchian D. Characterization of viscous fingering during displacements of low tension natural surfactant in fractured multi-layered heavy oil systems. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, no. 72, pp. 23–34.
38. Korotenko V.A., Yagafarov A.K., Sumin A.N. Defining the initial pressure gradient based on the results of hydrodynamic studies of wells. *Izvestiya vuzov: Neft i gaz*, 2012, no. 6, pp. 55–58. In Rus.
39. Telkov A.P., Grachev S.I., Gavrilov E.I., Krasnova T.L. *Prostranstvennaya filtratsiya i prikladnye zadachi razrabotki neftegazokondensatnykh mestorozhdeniy i neftegazodobychi* [Spatial filtration and applied problems of development of oil and gas condensate fields and oil and gas production]. Tyumen, NIPIKBS-T Publ., 2001. 460 p.

Received: 15 November 2018.

Information about the authors

Sergey I. Grachev, Dr. Sc., professor, head of the department of exploration and production of oil and gas fields, Tyumen Industrial University.

Valentin A. Korotenko, Cand. Sc., associate professor, Tyumen Industrial University.

Nelli P. Kushakova, Cand. Sc., associate professor, Tyumen Industrial University.

Aleksandr B. Kryakvin, Cand. Sc., associate professor, Tyumen Industrial University.

Olga P. Zotova, assistant, Tyumen Industrial University.

УДК 550.837.6

ПРИМЕНЕНИЕ ПСЕВДОВОЛНОВЫХ ТРАНСФОРМАНТ В ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ НАКЛОННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ГРАНИЦ

Грецков Глеб Андреевич¹,
Greckov.Gleb@gmail.com

Эпов Михаил Иванович¹,
EpovMI@ipgg.sbras.ru

Шеин Александр Николаевич¹,
SheinAN@ipgg.sbras.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3.

Актуальность. Метод нестационарных электромагнитных зондирований или зондирований становлением поля является востребованным инструментом при поиске и разведке месторождений различного типа полезных ископаемых. Современные задачи электроразведки требуют использования установок с большим числом источников и приёмников. Для подобного типа установок задача интерпретации полученных данных является весьма ресурсоемкой. Отсюда вытекает острая необходимость развития методов обработки и интерпретации данных, полученных в результате импульсных электромагнитных зондирований. Одним из возможных путей такого развития могут послужить трансформации данных зондирований становлением в пространство решений волнового уравнения.

Цель: применить метод волновой трансформации к данным зондирований становлением, зарегистрированным над проводящими средами с наклонной границей в многоразностных установках, для получения новых качественных оценок исследуемого геоэлектрического разреза.

Методика исследования базируется на новых численных алгоритмах для устойчивого преобразования данных зондирований становлением в волновую область. Исходные данные для отладки процедур трансформации (расчётные кривые становления поля) были получены с использованием программного комплекса MODEM3D, который предназначен для прямого моделирования переходных процессов диффузии электромагнитных полей.

Результаты. Были получены псевдодолновые трансформанты сигналов нестационарных электромагнитных зондирований в средах с наклонной границей, и построены их годографы. Полученные наборы трансформаций позволяют выделить линию выхода наклонного контакта на дневную поверхность. Установлено, что перекрывающие наносы ослабляют максимумы псевдодолновых трансформаций и снижают возможность точной локализации линии выхода наклонной границы. Рассмотрено поведение торидальных вихревых токов в зависимости от времени для модели геологической среды с наклонной границей.

Ключевые слова:

Нестационарные электромагнитные зондирования, псевдодолновые трансформанты, Q-преобразование, трёхмерная прямая задача, среда с наклонной границей, годограф.

Введение

В разведочной геофизике широко применяется метод нестационарных электромагнитных зондирований или зондирований становлением поля (ЗС), основанный на изучении временных развёрток откликов от импульсного токового возбуждения проводящих геологических сред. Он является востребованным инструментом как при геологоструктурных исследованиях и геологическом картировании, так и при поисках и разведке месторождений различного типа полезных ископаемых. При этом для достоверного построения пространственной структуры подземного полупространства необходимо использовать весьма ресурсоемкое численное моделирование решений как прямых, так и обратных трёхмерных задач электродинамики. Для восстановления структуры среды применяется широкий спектр процедур инверсии измеренных на дневной поверхности компонент магнитной индукции (или ЭДС, наведённой в измерительных контурах). В этой связи оказываются чрезвычайно полезными различные трансформации из-

меренных сигналов в кажущееся удельные электрические сопротивление ρ_r [1] или зависимости кажущейся продольной проводимости S_r от кажущейся глубины H_r [2]. В связи с многократно возросшей производительностью процессоров стало возможным создание процедур преобразования сигнала, описывающегося уравнением диффузии, в трансформанты, удовлетворяющие волновому уравнению (псевдодолновые трансформанты). Применение этого преобразования позволяет не только составить достоверное представление о строении исследуемой геологической среды, но и дополнять традиционные методы интерпретации [3].

Численное решение прямых задач ЗС

Для прямого моделирования переходных процессов диффузии электромагнитных полей от замкнутых токовых контуров в проводящих средах использовалась программа MODEM3D [4]. Соответствующая прямая задача в квазистационарном приближении решается векторным методом конечных элементов на неструктурированной трёх-

мерной тетраэдральной сетке. Интегрирование по времени выполняется с применением неявной схемы Кранка–Николсона второго порядка точности.

Повышение производительности вычислений базируется на распараллеленных алгоритмах, использующих многоядерные процессоры. Для массовых расчётов программа адаптирована к работе в системе распределённых вычислений (GRID-система) и облачных средах, организованных в ИНГГ СО РАН [5]. Тестирование на горизонтально-слоистых средах с простыми по форме неоднородностями показало, что для широкого класса моделей расчёты выполняются с высокой точностью [6].

Численное моделирование псевдодолновых трансформант

Для преобразования данных ЗС воспользуемся отображением пространства решений уравнения диффузии V в пространство решений волнового уравнения U . Это можно выполнить, используя преобразование Лапласа [7, 8]:

$$B(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi t}} \int_0^{\infty} q e^{-\frac{q^2}{4t}} U(q) dq. \quad (1)$$

В этом интегральном уравнении B – составляющая магнитной индукции переходного процесса, $U(q)$ – её псевдодолновая трансформанта, q^2 – аналог времени (приведённое время) в пространстве U . При преобразовании (1) остаётся неопределённость в выборе переменной приведённого времени. Её доопределение может быть выполнено исходя из физических или каких-либо иных соображений. Для нахождения псевдодолновой трансформанты необходимо решить обратную задачу с интегральным оператором. Известно, что её решение с экспоненциально затухающим при возрастании аргумента q ядром является неустойчивым и необходимо использовать различные методы регуляризации.

Обзор методов получения псевдодолновых трансформант

В работе [9] для данных электромагнитных зондирований с контролируемым источником (CSEM-Controlled Source ElectroMagnetic) применено сингулярное разложение, а полученное «недиффузионное» решение использовано для томографической инверсии. Хотя такой подход приводит к некоторым полезным результатам, трансформанты оказались сильно осциллирующими и непригодными для методов обработки сейсмических сигналов. В работе [10] показан способ стабилизации преобразования путём минимизации его L_1 -нормы методами линейного программирования. Другие попытки стабилизации с отображением пространства решений диффузионного уравнения в пространство решений волнового были предприняты в работах [11, 12]. В них в основном использовались методы разложения поля на базисные функции,

для которых преобразование (1) может быть выполнено в аналитическом виде. Все они базируются только на критерии вычислительной стабильности и не учитывают желаемые физические свойства результирующих псевдодолновых трансформант. Проблемы регуляризации решения интегрального уравнения (1) подробно описаны в диссертационной работе [13]. В ней обоснованы и применены для данных CSEM SVD-регуляризация и регуляризация Тихонова с различными параметрами. В работе [14] был проведён теоретический анализ и представлены численные результаты преобразования данных ЗС в псевдодолновые трансформанты. На их временных развёртках выделены эффекты отражения и рефракции. В работе [15] были проанализированы причины пространственной дисперсии псевдодолновых трансформант и представлена методика их уточнения с использованием деконволюции. По «исправленным» таким образом значениям точнее определяются границы погруженного проводящего объекта. Li X. Xue G. и Yin C описали метод увеличения пространственного разрешения для сигналов в установке с одним генераторным и несколькими приёмными контурами, основанный на принципе суперпозиции [16].

Для более точного вычисления псевдодолновых трансформант в работе [17] описан алгоритм субрегуляризации. Был рассмотрен альтернативный подход, основанный на так называемом обратном Q-преобразовании. В результате получаются трансформанты, удовлетворяющие стандартной системе волновых уравнений. Последние могут быть использованы в методах сейсмической миграции с более высоким пространственным разрешением целевых объектов для последующей прямой геологической интерпретации или уточнения начальной модели в инверсии.

В статьях [18, 19] рассмотрены примеры псевдодолновых трансформант нестационарной ЭДС в типичных горизонтально-слоистых моделях. Однако такой модельной базы недостаточно при изучении пространственно неоднородных геологических сред. Особенно это относится к средам с наклонными границами. В этом случае распределение и временная эволюция вихревых токов осложняется появлением поверхностных зарядов на этих границах и изменением степени затухания вторичных электромагнитных откликов во времени и пространстве. В результате инверсии таких данных в результирующей среде могут появляться ложные объекты или её восстановленная структура будет далека от истинной [20].

Псевдодолновые трансформанты в средах с наклонной границей

Рассмотрим контрастные геоэлектрические модели с наклонной границей, выходящей на плоскую дневную поверхность (верхнее полупространство предполагается непроводящим и немагнитным). Плоская контактная поверхность разделяет

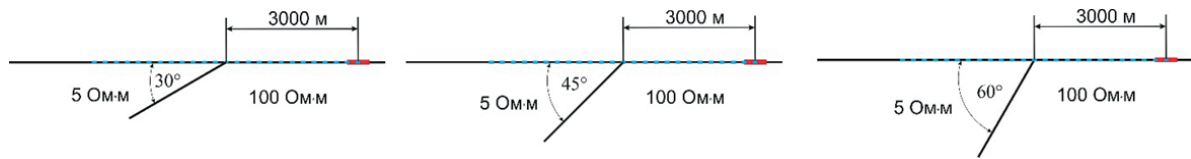


Рис. 1. Модели среды с наклонной границей

Fig. 1. Models of medium with inclined boundary

два проводящих немагнитных полубесконечных сектора с удельными электрическими сопротивлениями (УЭС) 5 и 100 Ом·м. Углы наклона границы составляют 30°, 45° и 60° (рис. 1).

Выберем поверхностную установку, содержащую один источник и набор приёмников, расположенных на линейном профиле, перпендикулярном наклонной границе. Источник представляет собой квадратный токовый контур со стороной 500 м и расположен на поверхности среды с высоким УЭС (100 Ом·м). Его центр находится на удалении 3000 м от выхода наклонного контакта на поверхность. Приёмники – квадратные петли со стороной 100 м, расположены по профилю с шагом между центрами 50 м. Центр наиболее удалённого приёмника находится на расстоянии 6000 м на дневной поверхности проводящего (5 Ом·м) сектора.

Как известно [1], после мгновенного выключения постоянного тока силой 1 А, текущего в генераторной петле, под дневной поверхностью возникает аналогичный по форме тороидальный токовый вихрь. С течением времени он распространяется вглубь и вширь проводящего полупространства, изменяя свою конфигурацию и амплитуду в зависимости от пространственного распределения

УЭС в среде. При этом интенсивность наведённых вихревых токов снижается за счёт перехода части электромагнитной энергии в джоулево тепло.

Введём декартову систему координат с началом в точке пересечения дневной поверхности, наклонного контакта и линейного профиля. Ось X совпадает с линейным профилем, а ось Z направлена вертикально вниз. На рис. 2, 3 показаны в вертикальном сечении (XOZ) распределения амплитуд электрического поля в различные моменты времени после выключения тока в источнике (показан тонким прямоугольником), вычисленные в программе MODEM3D.

На рис. 2 видно, что до момента времени $t=4,5$ мс электрический вихрь в виде тороида с квазикруговым сечением распространяется так же, как в однородном полупространстве с УЭС 100 Ом·м (первая фаза распространения). Как неоднократно указывалось в литературе, линии перемещения центров электрического вихря наклонены под углом примерно ± 26 градусов к дневной поверхности. После вышеуказанного момента времени появляется влияние наклонной границы (вторая фаза распространения). Оно выражается в существенном уменьшении глубины левого центра

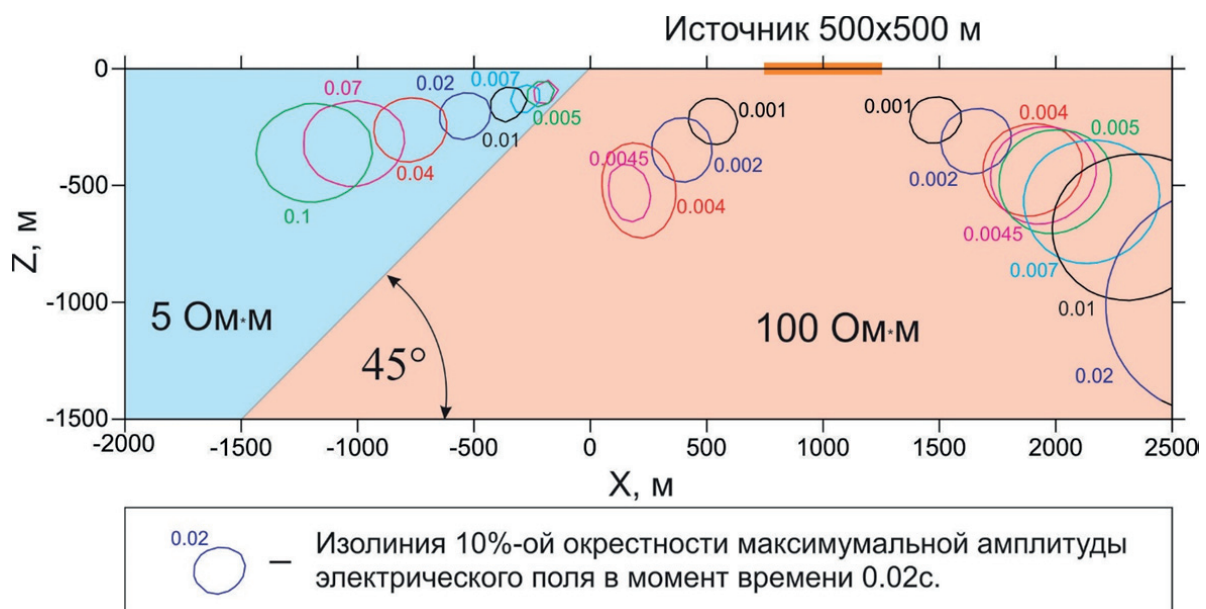


Рис. 2. Модель среды и изолинии 10 %-ой окрестности максимальной амплитуды электрического поля. Источник над частью среды с УЭС 100 Ом·м

Fig. 2. Model of medium and contour lines of 10 % locality for amplitude maximum of electric field. The field source is located above the part of the medium with 100 Ohm·m electrical resistivity

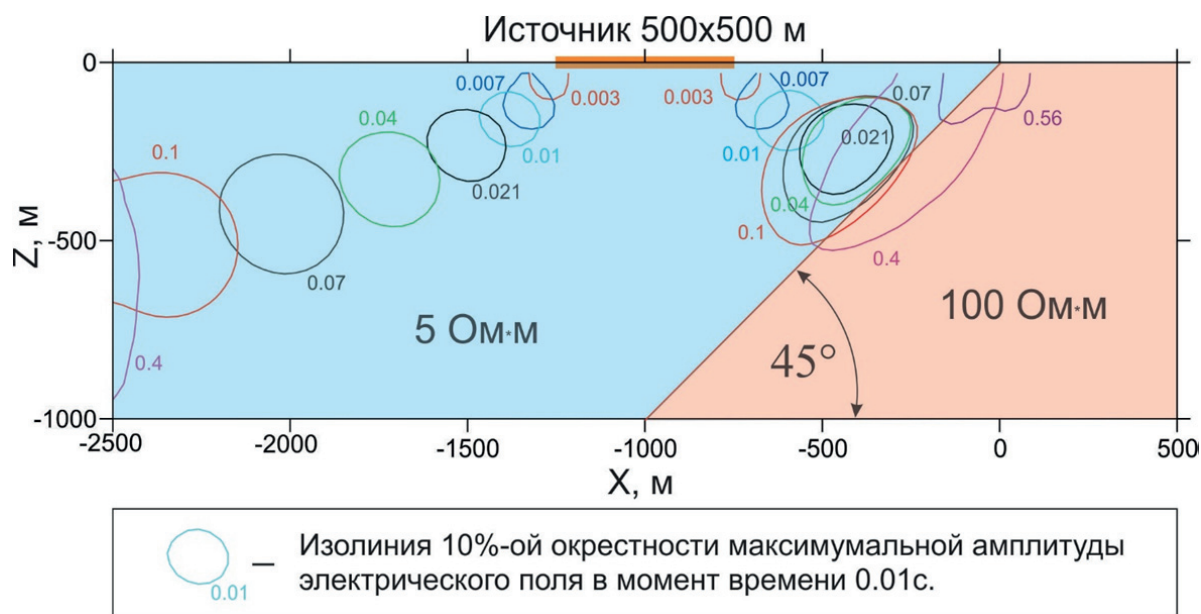


Рис. 3. Модель среды и изолинии 10%-й окрестности максимальной амплитуды электрического поля. Источник над частью среды с УЭС 5 Ом·м

Fig. 3. Model of medium and contour lines of 10% locality for amplitude maximum of electric field. The field source is located above the part of the medium with 5 Ohm·m electrical resistivity

электрического вихря и его дальнейшем распространении так же, как в полупространстве с УЭС 5 Ом·м. Отметим при этом, что скорости погружения центров электрических вихрей уменьшаются: для левого центра с $4 \cdot 10^5$ до $1 \cdot 10^5$ м/с (100 Ом·м) и с $5,2 \cdot 10^4$ до $0,35 \cdot 10^4$ м/с (5 Ом·м); для правого центра с $4 \cdot 10^5$ до $0,53 \cdot 10^5$ м/с. Таким образом, если в первой фазе распространения центры электрических вихрей лежат в горизонтальной плоскости, то во второй фазе они лежат в плоскости, наклоненной в сторону менее проводящей среды.

На рис. 3 наблюдается существенно отличная картина. Видно, что до момента времени $t=4,5$ мс левая часть электрического вихря распространяется так же, как в однородном полупространстве с УЭС 5 Ом·м (первая фаза распространения). Отметим при этом, что скорость погружения левого центра уменьшается с $5,2 \cdot 10^4$ до $0,35 \cdot 10^4$ м/с. Тогда как на траекторию движения правого центра уже с ранних времён ($t=7$ мс) начинают влиять поверхностные заряды, индуцированные на наклонной границе. Во второй фазе распространения правый центр электрического вихря движется вдоль наклонного контакта, медленно диффундируя в слабопроводящий сектор нижнего полупространства.

Таким образом, использование для решения задач инверсии таких кинематических характеристик, как скорости распространения электрических вихрей, не представляется возможным из-за их сильной зависимости от времени.

На рис. 4 приведены временные развёртки ЭДС, наведённых в приёмниках текущими в среде вторичными вихревыми токами и поверхностными зарядами, при различных расстояниях (разно-

сах) от источника до приёмника (шифр кривых). Разнос 3000 м соответствует выходу наклонного контакта на поверхность на линии ($X=Z=0$ м).

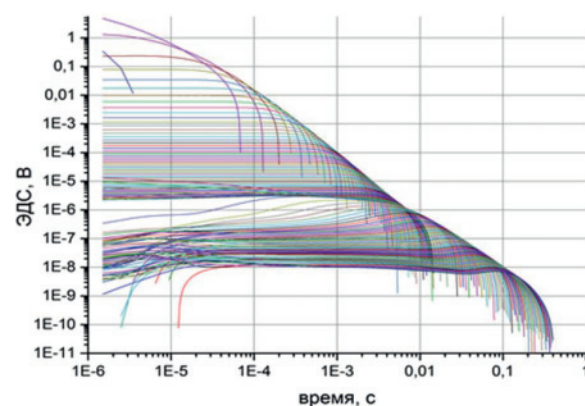


Рис. 4. ЭДС в многоразностной установке (наклон границы 30°)

Fig. 4. EMF for multispacing array (30° incline of boundary)

В соответствии с (1) для установки с фиксированным разномом были вычислены псевдодолговые трансформанты в зависимости от приведённого времени. Алгоритм расчётов описан в работах [18, 19]. На рис. 5 показан их сводный набор для многоразностной установки.

Похожая картина наблюдается для границы с наклоном 45° (рис. 6). При этом экстремумы псевдодолговых трансформант изменяют своё положение при переходе приёмников через наклонную границу (разнос 3000 м).

Построим годографы псевдодолговых трансформаций (рис. 7), связав q -время его экстремума (ось ординат) и расстояние между источником и

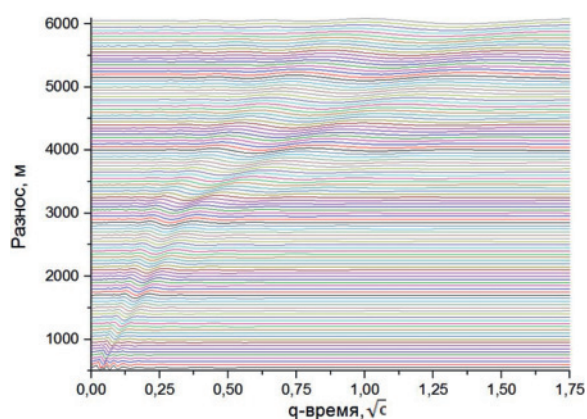


Рис. 5. Псевдодолновые трансформанты (наклон границы 30°)

Fig. 5. Pseudowave transformants (30° incline of boundary)

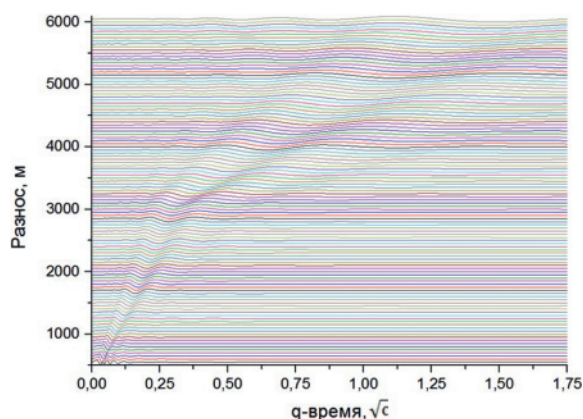


Рис. 6. Псевдодолновые трансформанты (наклон границы 45°)

Fig. 6. Pseudowave transformants (45° incline of boundary)

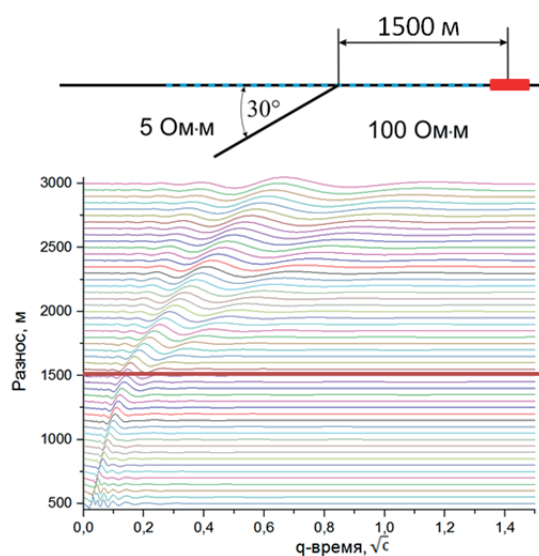


Рис. 8. Псевдодолновые трансформанты (источник располагается в 1500 м (слева или справа) от места выхода наклонного контакта на поверхность)

Fig. 8. Pseudowave transformants (field source is located at 1500 m (left or right) from the exit to the surface of inclined boundary)

каждым приёмником (ось абсцисс). На годографах отчетливо выделяется выход контакта на поверхность – координата 3000 м. Левые части годографов (от 500 до 3000 м) для сред с различным углом наклона границы одинаковы и совпадают с годографом на поверхности проводящего полупространства с УЭС 100 Ом·м. После перехода приёмников через границу годографы для различных углов расходятся между собой. При этом угол наклона годографа возрастает с увеличением наклона на границы.

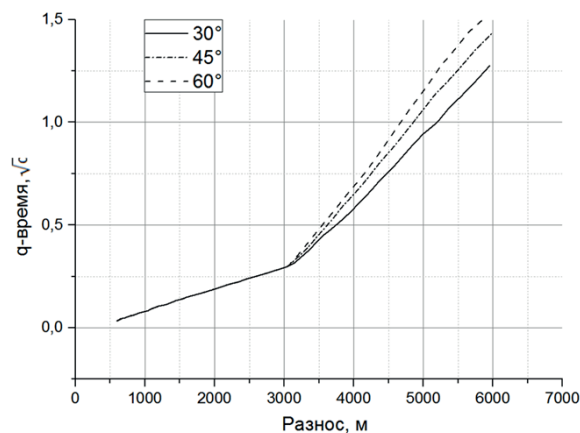


Рис. 7. Годографы в среде с наклонной границей (шифр кривых – угол наклона)

Fig. 7. Travel-time plot for the medium with inclined boundary (legend – incline on boundary)

На рис. 8 показаны две зеркальные расстановки источника и приёмников относительно линии выхода контакта на поверхность, а также соответствующие псевдодолновые трансформанты. Крас-

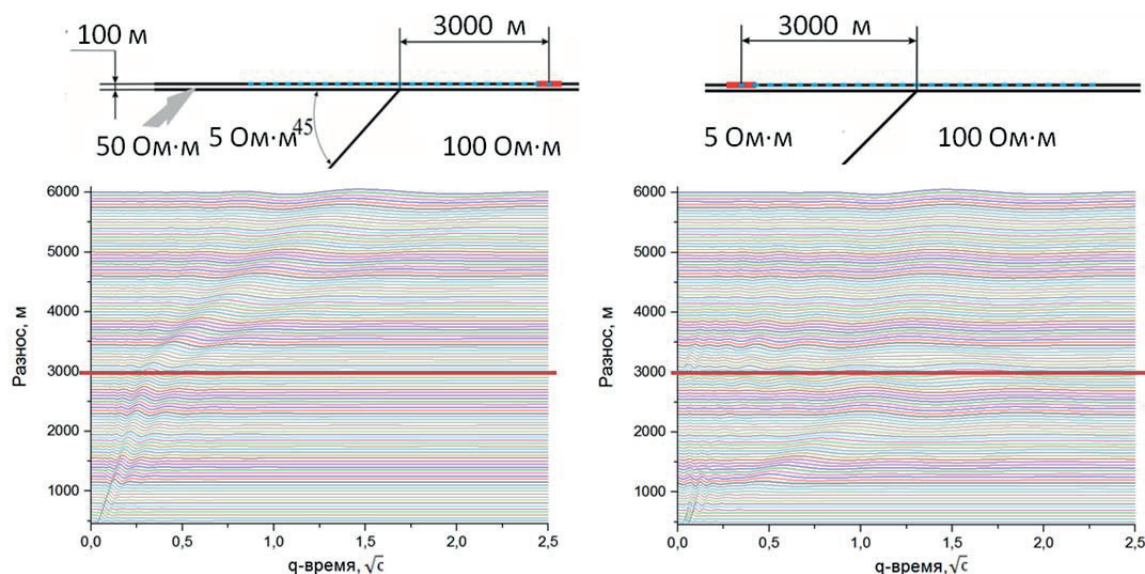


Рис. 9. Псевдодолговые трансформанты (источник располагается в 3000 м (слева или справа) от места выхода наклонного контакта на поверхность)

Fig. 9. Pseudowave transformants (field source is located at 3000 m (left or right) from the exit to the surface of inclined boundary)

ными линиями выделено место выхода наклонного контакта на дневную поверхность.

Рассмотрим ту же самую модель с добавлением относительно маломощных (100 м) наносов с УЭС 50 Ом·м. На рис. 9 показаны псевдодолговые волновые трансформанты.

Наносы практически не влияют на определение места выхода наклонного контакта, если источник расположен над высокоомным сектором среды. Если же источник находится на поверхности более проводящего сектора, то выход контакта под наносы становится практически незаметным.

Заключение

Вторичные вихревые токи, индуцированные в проводящей среде после отключения источника,

представляют собой замкнутые тороидальные структуры. Центры их сечений движутся в среде со скоростью, зависящей от времени, что не позволяет их использовать при инверсии в качестве кинематических характеристик.

Введение псевдодолговых трансформаций позволяет получать годографы из данных метода ЗС, зарегистрированных на линейных профилях. Наборы псевдодолговых трансформаций, построенные в координатах «разнос – приведенное время», позволяют даже на качественном уровне выделить линию выхода наклонного контакта на дневную поверхность. Перекрывающие наносы ослабляют максимумы псевдодолговых трансформаций и снижают возможность точной локализации линии выхода наклонной границы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кауфман А.А., Морозова Г.М. Теоретические основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне. – Новосибирск: Наука, Сибирское отд., 1970. – 123 с.
2. Сидоров В.А. Импульсная электроразведка. – М.: Недра, 1985. – 192 с.
3. Эпов М.И., Ельцов И.Н. Прямые и обратные задачи индуктивной геоэлектрики в одномерных средах. – Препринт ОИГГиМ СО РАН. – 1992. – № 2. – 31 с.
4. Программное обеспечение Модем 3D для интерпретации данных нестационарных зондирований с учётом эффектов вызванной поляризации / М.И. Иванов, В.А. Катешов, И.А. Кремер, М.И. Эпов // Записки Горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 242–245.
5. Использование свободных сетевых ресурсов предприятия для решения ёмких вычислительных геофизических задач / А.С. Мартынов, Д.В. Тейтельбаум, К.С. Сердюк, А.А. Власов, И.Н. Ельцов // Каротажник. – 2011. – № 11 (209). – С. 56–64.
6. Physical and mathematical modeling of transient electromagnetic soundings over salt-dome structures / N.Yu. Bobrov, S.S. Krylov, E.Yu. Antonov, A.N. Shein, N.P. Smilevets // Russian Geology and Geophysics. – 2017. – V. 58. – P. 266–274.
7. Lee S., Memechan G.A. Phase-field imaging: the electromagnetic equivalent of seismic migration // Geophysics. – 1987. – № 52 (5). – P. 678–693.
8. Lee K.H. A new approach to modeling the electromagnetic response of conductive medium // Geophysics. – 1989. – № 54 (9). – P. 1180–1192.
9. Lee K.H., Xie G. A new approach to imaging with low-frequency electromagnetic fields // Geophysics. – 1993. – № 58. – P. 780–796.
10. Levy S., Oldenburg D., Wang J. Subsurface imaging using magnetotelluric data // Geophysics. – 1988. – № 53. – P. 104–117.
11. Gilbert D., Virieux J. Electromagnetic imaging and simulated annealing // Geophysics. – 1991. – № 96. – P. 8057–8067.
12. Gershenson M. Simple interpretation of time-domain electromagnetic sounding using similarities between wave and diffusion propagation // Geophysics. – 1997. – № 62 (3). – P. 763–774.
13. Swidinsky A. Transient Electromagnetic Modelling and Imaging of Thin Resistive Structures: Applications for Gas Hydrate As-

- essment // A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Department of Physics University. – Toronto, 2011. – 255 p.
14. An optimized method for transient electromagnetic field-wave field conversion / X. Li, G.Q. Xue, J.P. Song, W.B. Guo, J.J. Wu // Chin J. Geophys. – 2005. – № 48 (5). – P. 1185–1190.
15. Xue G.Q., Yan Y.J., Li X. Control of the waveform dispersion effect and applications in a TEM imaging technique for identifying underground objects // J. Geophys. Eng. 8. – 2011. – P. 195–201.
16. Li X., Xue G., Yin C. Migration imaging of the transient electromagnetic method. – Beijing: Science Press, 2016. – 139 p.
17. Xue G.Q., Bai C.Y., Li X. Extracting virtual reflection wave from TEM data based on regularizing method // Pure appl. Geophys. – 2012. – № 69 (7). – P. 1269–1282.
18. Грецков Г.А., Эпов М.И., Антонов Е.Ю. Алгоритмы и программы для преобразования данных зондирования становлением поля в пространство решений волнового уравнения // Вопросы естествознания. – 2016. – № 1 (9). – С. 115–119.
19. Gretsikov G.A., Epov M.I., Antonov E.Yu. Wave transforms of transient electromagnetic field in conductive earth // Russian Geology and Geophysics. – 2017. – V. 58 (201). – P. 744–751.
20. Approximation of a near-vertical boundary in the problems of pulsed electromagnetic soundings / N.V. Shtabel', M.I. Epov, E.Yu. Antonov, M.A. Korsakov // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – V. 55. – P. 89–97.

Поступила 23.11.2018 г.

Информация об авторах

Грецков Г.А., аспирант, инженер Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН.

Эпов М.И., доктор технических наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН.

Шеин А.Н., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН.

УДК 550.837.6

APPLYING PSEUDOWAVE TRANSFORMATION IN TRANSIENT ELECTROMAGNETIC PROSPECTING FOR RECOGNITION OF INCLINED GEOLOGICAL BOUNDARIES

Gleb A. Gretskov¹,
Greckov.Gleb@gmail.com

Mikhail I. Epov¹,
EpovMI@ipgg.sbras.ru

Aleksandr N. Shein¹,
SheinAN@ipgg.sbras.ru

¹ Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuk SB RAS,
3, Academician Koptuev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

Relevance. Transient electromagnetic soundings is the method in-demand of electric survey applied for mineral deposits prospecting. Modern geoelectric problems require the usage of multichannel devices. For such devices the processing and interpretation problem becomes very resource intensive. Thus, the further development of interpretation methods is highly recommended. One of the possible ways of such development is the usage of wavefield transformation for transient electromagnetic data.

The main aim of the research is to apply the wavefield transformation to the transient electromagnetic data measured in multireceivers systems in conductive media with inclined boundary for obtaining new qualitative estimations for the geological media on study.

Method of research is based on new numerical algorithms for the stable wavefiled transformations of transient electromagnetic soundings data. Input data for transformation checkout (calculated three-dimensional curves of transient electromagnetic field response) was received using MODEM3D software package, which is designed for direct modeling of transient electromagnetic fields.

Results. Pseudowave transformations of transient electromagnetic soundings for the conductive media with inclined boundary were obtained. These pseudowave transformations are used to plot travel-time curves. The resulting sets of transformations allow allocating the outcrop of the inclined contact on the surface. It is established that overlapping sediments weaken the maxima of pseudowave transformations and reduce the possibility of exact localization of the outcrop of the inclined contact. The behavior of toroidal vertical currents depending on time in the media with inclined boundary was considered.

Key words:

Transient electromagnetic soundings, pseudowave transform, Q-transform, three-dimensional problem, medium with inclined boundary, hodograph.

REFERENCES

1. Kaufman A.A., Morozova G.M. *Teoreticheskie osnovy metoda zondirovaniy stanovleniem polya v blizhney zone* [Theoretical bases of the near-field transient electromagnetic sounding method]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1970. 123 p.
2. Sidorov V.A. *Impulsnaya elektrorazvedka* [Pulse electric sounding]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 192 p.
3. Epov M.I., Eltsov I.N. Pryamye i obratnye zadachi induktivnoy geoelektriki v odnomernykh sredakh [Direct and inverse problems of inductive geoelectrics in one-dimensional media]. *Preprint OIGGiM SO RAN*, 1992, no. 2, 31 p.
4. Ivanov M.I., Kateshov V.A., Kremer I.A., Epov M.I. Modem 3D new software for the interpretation of IP-affected 3D tem data. *Journal of Mining Institute*, 2009, vol. 183, pp. 242–245. In Rus.
5. Martyanov A.S., Teytelbaum D.V., Serdjuk K.S., Vlasov A.A., Eltsov I.N. Using vacant network resources of a company for solving geophysical problems requiring much computation. *Sci-tech bulletin Karotazhnik (Well Logger)*, 2011, no. 11 (209), pp. 56–64. In Rus.
6. Bobrov N.Ju., Krylov S.S., Antonov E.Yu., Shein A.N., Smilevec N.P. Physical and mathematical modeling of transient electromagnetic soundings over salt-dome structures. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, pp. 266–274.
7. Lee S., Memechan G.A. Phase-field imaging: the electromagnetic equivalent of seismic migration. *Geophysics*, 1987, no. 52 (5), pp. 678–693.
8. Lee K.H. A new approach to modeling the electromagnetic response of conductive medium. *Geophysics*, 1989, № 54 (9), pp. 1180–1192.
9. Lee K.H., Xie G. A new approach to imaging with low-frequency electromagnetic fields. *Geophysics*, 1993, no. 58, pp. 780–796.
10. Levy S., Oldenburg D., Wang J. Subsurface imaging using magnetotelluric data. *Geophysics*, 1988, no. 53, pp. 104–117.
11. Gilbert D., Virieux J. Electromagnetic imaging and simulated annealing. *Geophysics*, 1991, no. 96, pp. 8057–8067.
12. Gershenson M. Simple interpretation of time-domain electromagnetic sounding using similarities between wave and diffusion propagation. *Geophysics*, 1997, no. 62 (3), pp. 763–774.
13. Swidinsky A. *Transient Electromagnetic Modelling and Imaging of Thin Resistive Structures: Applications for Gas Hydrate Assessment. A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Department of Physics University. Toronto*, 2011. 255 p.
14. Li X., Xue G.Q., Song J.P., Guo W.B., Wu J.J. An optimized method for transient electromagnetic field-wave field conversion. *Chin J. Geophys.*, 2005, no. 48 (5), pp. 1185–1190.
15. Xue G.Q., Yan Y.J., Li X. Control of the waveform dispersion effect and applications in a TEM imaging technique for identifying underground objects. *J. Geophys. Eng.* 8, 2011, pp. 195–201.
16. Li X., Xue G., Yin C. *Migration imaging of the transient electromagnetic method*. Beijing, Science Press, 2016. 139 p.
17. Xue G.Q., Bai C.Y., Li X. Extracting virtual reflection wave from TEM data based on regularizing method. *Pure appl. Geophys.*, 2012, no. 69 (7), pp. 1269–1282.
18. Gretskov G.A., Epov M.I., Antonov E.Yu. Algorithms and programs for data conversion sounding in the space of solutions of the wave equation. *Voprosy estestvoznaniya*, 2016, no. 1 (9), pp. 115–119. In Rus.

19. Gretskov G.A., Epov M.I., Antonov E.Yu. Wave transforms of transient electromagnetic field in conductive earth. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58 (201), pp. 744–751.
20. Shtabel N.V., Epov M.I., Antonov E.Yu., Korsakov M.A. Approximation of a near-vertical boundary in the problems of pulsed electromagnetic soundings. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, pp. 89–97.

Received: 23 November 2018.

Information about the authors

Gleb A. Gretskov, postgraduate, engineer, Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuk SB RAS.

Mikhail I. Epov, Dr. Sc., professor, RAS academician, senior researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuk SB RAS.

Aleksandr N. Shein, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuk SB RAS.

УДК 622.276.72

АНАЛИЗ ОТЛОЖЕНИЙ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЛЕЙ В СИСТЕМЕ СБОРА НСП «Б», ДНС-5 «А»

Яркеева Наталья Расатовна¹,
yarkeevan@yandex.ru

Галкова Алсу Фаузитовна¹,
alsugalkova1995@mail.ru

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

Актуальность. В настоящее время проблема образования отложения солей очень актуальна и важна. Добыча нефти затрудняется с появлением неорганических отложений, которые образуются в призабойной зоне скважин и в системах сбора и подготовки скважинной продукции. Последствием отложения солей является снижение коэффициента продуктивности скважин, из-за чего происходит значительная потеря нефти. Также по причине недостаточного притока возникает риск отказа глубинно-насосного оборудования, происходит снижение наработки на отказ этого оборудования из-за того, что возникают заклинивания электроприводного центробежного насоса и клапанов штангового глубинного насоса. По этим причинам нефтяные компании терпят значительные убытки, так как возникает необходимость больших затрат на мероприятия по предупреждению и борьбе с солевыми отложениями.

Цель. Определить методы предупреждения отложений и методы борьбы с ними. Выяснить будет ли выпадать осадок в результате определения коэффициента пересыщения φ по методике Скилмена–Мак-Дональда–Стиффа. Провести анализ исследований по определению компонентного состава отложений.

Методы. При проведении расчетов использовалась методика Скилмена–Мак-Дональда–Стиффа. Неорганическая часть отложений определялась методом рентгеновской дифрактометрии на порошковом дифрактометре Shimadzu XRD-6000.

Результаты. Анализ результатов определения макро- и микрокомпонентного состава вод показал, что в пробах попутно-добываемых вод, отобранных с добывающих скважин и автоматизированные групповые замерные установки месторождения Х, содержится существенное количество ионов кальция и сульфат-ионов, что может привести к образованию отложений нерастворимых солей, таких как кальцит и гипс. В скважинах под номерами 5 и 311 коэффициент пересыщения $\varphi > 1$ (существует пересыщенность пластовой воды гипсом). В этих скважинах гипс имеет возможность выпадать и в объеме, и на самой поверхности теплообмена. В скважине под номером 158 коэффициент пересыщения $\varphi < 1$. При ненасыщенности им пластовой воды выпадение осадка в объеме не будет. Однако на поверхности теплообмена, вследствие частичного выпаривания раствор особо насыщается гипсом. Из-за этого гипс способен откладываться и при некоторой недонасыщенности им пластовой воды – при понижении коэффициента φ до 0,9. Чтобы отложения гипса не осложняли добычу нефти, нужно заранее предупреждать образования отложений. Для предотвращения образования отложений необходимо подобрать эффективный ингибитор солеотложений для условий месторождений, осуществляющих сбор на НСП «Б». С целью защиты системы нефтесбора рекомендуется организовать подачу ингибитора солеотложений.

Ключевые слова:

Отложения, выпадение осадка, неорганические соли, кальцит, гипс, ингибитор солеотложений.

Введение

В лаборатории института проведены исследования по определению компонентного состава отложений с площадного объекта НСП «Б» и напорного нефтепровода ДНС-5 «А» – НСП «Б» (табл. 1).

На рис. 1, 2 представлен внешний вид отложений до (а) и после (б) отмывки органическим растворителем.

Содержание органической и неорганической частей осадков с НСП «Б» представлено в табл. 1.

Отложения, отобранные на НСП «Б» НГДУ, представляли собой смесь органической (углеводородной) (15,9–33,9 %) и неорганической частей (66,1–84,1 %). Отложения, отобранные со сборных и напорных трубопроводов, представляют собой смесь органической (углеводородной) (5,1–10,2 %) и неорганической частей (89,8–94,9 %).



а/а



б/б

Рис. 1. Отложения, отобранные со входа НСП «Б»

Fig. 1. Deposits selected from the entrance of the NSP «B»



a/a



b/b

Рис. 2. Отложения, отобранные с теплообменника НСП «Б»

Fig. 2. Deposits selected from the heat exchanger NSP «B»

Таблица 1. Содержание неорганической и органической частей осадков в отобранных отложениях

Table 1. Content of inorganic and organic parts in the selected sediments

Наименование объекта Name of object	Дата отбора Date of selection	Содержание/Contents, %	
		Неорганическая часть Inorganic part	Органическая часть Organic part
Отложения с трубопровода (вход О-1) Deposits from the pipeline (O-1 inlet)	18.03.18	66,1	33,9
Отложения с трубопровода (теплообменники О-1) Deposits from the pipeline (O-1 heat exchangers)	18.03.18	84,1	15,9
Отложения с технологических трубопроводов НСП «Б» Deposits from technological pipelines of NSP «B»	29.03.18	68,2	31,8
Отложения с напорного нефтепровода ДНС-5 «А» – НСП «Б» Deposits on the pressure of the pipeline BPS-5 «A» – NSP «B»	13.07.18	94,9	5,1
Отложения с трубопровода АГЗУ 258 – ДНС «А» Deposits from the pipeline AGZU 258- BPS-5 «A»	28.09.18	89,8	10,2

С трубопровода ДНС-5 «А» – НСП «Б» и с трубопровода АГЗУ 258 – ДНС «А» отложения состоят из органической (углеводородной) (5,1–10,2 %) и неорганической частей (89,8–94,8 %).

В табл. 2 приведен компонентный состав неорганической части отложений.

Неорганическая часть отложений с входа в О-1 НСП «Б», с технологических трубопроводов НСП «Б», с напорного нефтепровода ДНС-5 «А»–НСП «Б» состоит из сульфата кальция (гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и бассанита $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) с его содержанием 97,5–100 %. Неорганическая часть отложений с теплообменника О-1 НСП «Б» состоит преимущественно из карбоната кальция (кальцит, CaCO_3) с его содержанием 68,1 %.

Для неорганической части отложений определен компонентный состав методом рентгеновской дифрактометрии, на порошковом дифрактометре Shimadzu XRD-6000. Процентное соотношение компонентов рассчитывалось при помощи программного обеспечения SiroQuant [1–3].

Лабораторный опыт по отмывке проводился на осадках, отобранных с трубопровода на входе в О-1 (преимущественно представлен гипсом) и на осадке с теплообменника О-1 (преимущественно представлен кальцитом).

В условиях лаборатории для удаления отложений были опробованы водные растворы гидроксида натрия (20 %) и ингибированной соляной кислоты (8 %). Раствором щелочи и кислоты пробы

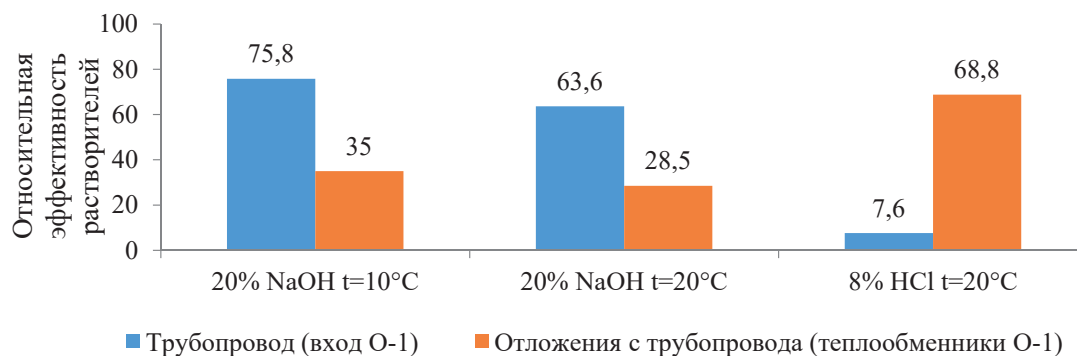


Рис. 3. Относительная эффективность водных растворов гидроксида натрия и ингибированной соляной кислоты

Fig. 3. Relative effectiveness of aqueous solutions of sodium hydroxide and inhibited hydrochloric acid

Таблица 2. Компонентный состав неорганической части отобранных отложений

Table 2. Component composition of inorganic part of selected sediments

Место отбора Place of selection	Дата отбора Selection date	Компонентный состав неорганической части отложений Component composition of inorganic part of sediments	
		Соединение Compound	Содержание, % Content, %
Трубопровод (вход О-1) Pipeline (O-1 inlet)	18.03.18	Дигидрат сульфата кальция (гипс, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Calcium sulfate dihydrate (gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	54,0
		Полугидрат сульфата кальция (бассанит, $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) Calcium sulfate semihydrate (bassanite, $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$)	46,0
Отложения с трубопровода (теплообменники О-1) Deposits from the pipeline (O-1 heat exchangers)	18.03.18	Карбонат кальция (кальцит, CaCO_3) Calcium carbonate (calcite, CaCO_3)	68,1
		Дигидрат сульфата кальция (гипс, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Calcium sulfate dihydrate (gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	19,2
		Натрий хлористый (NaCl) Sodium chloride (NaCl)	7,4
		Оксид кремния (кварц, SiO_2) Silicon oxide (quartz, SiO_2)	5,4
Отложения с технологических трубопроводов НСП «Б» Deposits from PS process pipelines NSP «B»	29.03.18	Дигидрат сульфата кальция (гипс, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Calcium sulfate dihydrate (gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	75,4
		Карбонат кальция (кальцит, CaCO_3) Calcium carbonate (calcite, CaCO_3)	12,3
		Натрий хлористый (NaCl) Sodium chloride (NaCl)	6,1
		Оксид кремния (кварц, SiO_2) Silicon oxide (quartz, SiO_2)	4,1
		Сульфид железа (FeS) Iron sulfide (FeS)	2,2
Отложения трубопровода ДНС-5 А – НСП Б Deposits of pipeline DNS-5 A-NSP B	13.07.18	Дигидрат сульфата кальция (гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Calcium sulfate dihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ gypsum)	97,5
		Натрий хлористый (NaCl) Sodium chloride (NaCl)	2,5
Отложения с трубопровода АГЗУ 258 – ДНС «А» Deposits from the pipeline AGZU 258-DNS «A»	28.09.18	Дигидрат сульфата кальция (гипс, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Calcium sulfate dihydrate (gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	97,5
		Оксид кремния (кварц, SiO_2) Silicon oxide (quartz, SiO_2)	1,3
		Натрий хлористый (NaCl) Sodium chloride (NaCl)	1,2

отложений обрабатывали в течение 4 часов при температурах +10 и +20 °С, массовое соотношение исследуемый образец: реагент составило 1:10. По истечении 4 часов эксперимента осадок переносился на фильтр «синяя» лента и промывался дистиллированной водой до значения pH 6,6.

Результат обработки отложений растворами щелочей и кислот представлен в табл. 3 и на рис. 3.

Таблица 3. Относительная эффективность растворителей по отношению к отложениям

Table 3. Relative efficiency of solvents in relation to sediments

Наименование образца Sample name	20 % NaOH $t=10^\circ\text{C}$	20 % NaOH $t=20^\circ\text{C}$	8 % HCl $t=20^\circ\text{C}$
Вход О-1 (гипс) O-1 entrance (gypsum)	76	64	8
Теплообменник О-1 (кальцит) Heat exchangers-1 (calcite)	35	29	69

Из лабораторных исследований следует, что при температуре 20 °С диспергирование гипса в 20 %-м растворе гидроксида натрия составляет 64 %, тогда как в растворе соляной кислоты – 8 %. Для осадка, представленного преимуще-

ственно кальцитом, соляная кислота, наоборот, обладает большей эффективностью (69 %) по сравнению с 20 %-м гидроксидом натрия (29 %).

Для выявления причин образования отложений в системе сбора месторождения Х в напорных нефтепроводах ДНС-5 «А» – НСП «Б» был проведен анализ макрокомпонентного состава попутно-добываемых вод (табл. 4).

Анализ результатов определения макро- и микрокомпонентного состава вод показал, что в пробах попутно-добываемых вод, отобранных с добывающих скважин и АГЗУ месторождения Х, содержится существенное количество ионов кальция и сульфат-ионов, что может привести к образованию отложений нерастворимых солей, таких как кальцит и гипс. Исходя из табл. 2, основным осадком здесь является дигидрат сульфата кальция (гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) [4–8].

Произведем расчет коэффициента пересыщения ϕ в трех добывающих скважинах № 5, 158 и 311.

Для определения выпадения осадка расчет будем вести по методике Скилмена–Мак Дональда–Стиффа. Суть этого способа заключается в том,

Таблица 4. Макро- и микрокомпонентный состав попутно-добываемых вод из добывающих скважин месторождения X

Table 4. Macro- and microcomponent composition of associated-produced water from production wells of the X deposit

Точка отбора (скважина) Selection point (well)	Пласт Layer	Дата отбора Selection date	Содержание ионов, мг/дм ³ / Ion content, mg/dm ³								pH, ед./unit	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³
			Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Sr ²⁺	Ba ²⁺		
5	СТкиз/STkiz	09.04.2018	151566,5	2864	225,7	4671,3	1072,5	96421,6	86	<1,0	6,9	1,178
158		05.12.2018	185446	1136	122	6513	1672	115064	–	–	6,3	1,191
311	Дмул, Дпап Dmul, Dpash	05.12.2018	169397,8	319	67,1	38326,5	3800	61469,9	–	–	5,5	1,185

Таблица 5. Результаты расчетов трех добывающих скважин 5, 158, 311

Table 5. Results of three producing well 5, 158, 311

№ скважины Well no.	Фактическая концен- трация, С, мг-экв/л Actual concentration, C, mg-eq/l	Избыточная концен- трация X, мг/л Excess concentration, X, mg/l	Ионная сила ра- створа, I, мг/л Ionic solution strength, I, mg/l	Константа ра- створимости Solubility con- stant K×10 ⁻⁴	Равновесная концен- трация, С ^р , мг-экв/л Equilibrium concentra- tion C ^p , mg-eq/l	Коэффициент пе- ресыщения, φ Supersaturation factor, φ
5	59,66667	0,086997	4,626666	26,43	47,68963	1,251146
158	23,66667	0,151011	5,615238	21,27	25,94194	0,912294
311	6,645833	0,954845	5,959068	19,35	4,044449	1,643199

что определяется равновесная концентрация сульфата кальция и сопоставляется с фактической концентрацией сульфата кальция в пластовых или попутно-добываемых водах [9, 10].

Склонность пластовой воды к отложению гипса оценивается по коэффициенту пересыщения:

$$\varphi = \frac{C_{\text{CaSO}_4}}{C_{\text{CaSO}_4}^p},$$

где C_{CaSO_4} – фактическая концентрация гипса в пластовой воде, которая определяется по концентрации того иона Ca^{2+} или SO_4^{2-} , присутствовавшего в меньшем количестве, мг-экв/л; $C_{\text{CaSO}_4}^p$ – равновесная концентрация гипса в пластовой воде, мг-экв/л. Результаты расчетов представлены в табл. 5. По проведенным расчетам можно сделать следующие выводы. В скважинах № 5 и 311 коэффициент пересыщения $\varphi > 1$, при пересыщенности пластовой воды гипсом это означает, что в этих скважинах гипс может выпасть и в объеме, и на самой поверхности теплообмена. В скважине № 158 коэффициент пересыщения $\varphi < 1$, при ненасыщенности им пластовой воды выпадение осадка в объеме не будет. Однако на поверхности теплообмена вследствие частичного выпаривания раствор особо насыщается гипсом. Из-за этого гипс способен откладываться при некоторой недонасыщенности им пластовой воды при понижении коэффициента φ до 0,9.

Заключение

Для того чтобы отложения гипса не осложняли добычу нефти, нужно заранее предупреждать их образование физическими, технологическими и химическими методами [11–14]. Физические методы предупреждения заключаются в воздействии на продукцию: магнитным полем, электромагнитным полем, акустическим полем и токами высокой частоты. К технологическим методам относят

применение низкоадгезионных защитных покрытий ВСО, изменение технических режимов работы скважин и насосного оборудования, турбулизацию потоков, применение хвостовиков, солесборников, минимизацию выноса мехпримесей, подбор и подготовку рабочего агента для ППД, ограничение водопритока к скважине, подавление биоценоза. На рассматриваемом объекте предлагаются именно такие методы предупреждения образования отложений солей. К химическим методам относится применение ингибиторов солеотложения, а также выбор «безопасных» жидкостей глушения [15, 16]. С целью защиты системы нефтесбора рекомендуется организовать подачу ингибитора солеотложения и необходимо подбирать эффективный ингибитор солеотложений для условий месторождений, осуществляющих сбор на НСП «Б» [17].

При этом ингибитор должен соответствовать общим требованиям для промышленного применения. Эффективность ингибирования солеотложения в условиях, максимально приближенных к реальным, совместимость с пластовой водой и использующимися водными жидкостями глушения, влияние на процесс промысловой подготовки нефти, оценка адсорбционно-десорбционных свойств на моделях, влияние на набухание водочувствительных глин и т. д. [18].

Была рассмотрена проблема образования отложения солей, проведен анализ этих отложений. Определено процентное содержание неорганической и органической частей осадков. Были выяснены причины образования отложений солей в системе сбора месторождения X, в напорных нефтепроводах с помощью анализа макрокомпонентного состава попутно-добываемых вод. Анализ показал, что в пробах попутно-добываемой воды содержится существенное количество ионов кальция и сульфат-ионов, которые могут быть причиной образования отложения солей. Произведен расчет коэф-

фициента пересыщения ϕ по методике Скилмена–Мак–Дональда–Стиффа. По полученным значениям можно сделать вывод, что в скважинах гипс может выпадать и в объеме, и на самой поверхности теплообмена.

В наши дни проблема, связанная с образованием отложения солей, является очень острой для

нефтедобычи [19]. Она несет большие убытки нефтедобывающим предприятиям. Нужно заранее предупреждать образование отложений, выбирая методы предупреждения. Также немаловажен такой вопрос, как подбор эффективного ингибитора в борьбе с уже образовавшимися отложениями солей [20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение механических методов предупреждения отложения солей в скважинах залежей / Ю.Н. Легаев, И.С. Ванюрин, Д.В. Пицаев, Ф.А. Галиев, К.В. Валовский // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 7. – С. 58–60.
2. Бешагина Е.В., Можайская М.В. Подбор эффективного ингибитора солеотложения и его концентрации при эксплуатации месторождений // Успехи современной науки и образования. – 2016. – Т. 5. – № 12. – С. 76–81.
3. Аксенов Д.А. Эксплуатация скважин в условиях солеотложения // Академический журнал Западной Сибири. – 2016. – Т. 12. – № 2. – С. 5.
4. Шангараева Л.А., Максютин А.В., Султанова Д.А. Способы предотвращения солеотложения при разработке и эксплуатации залежей нефти // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – С. 336.
5. Антониади Д.Г., Савенок О.В. Проблема солеотложения – общие принципы и особенности конкретных решений // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 87. – С. 260–275. URL: <http://ej.kubagro.ru/a/viewaut.asp?id=2734> (20.04.2019).
6. Повышение эффективности использования ингибиторов отложения солей / Ю.В. Антипин, Н.Р. Яркеева, Г.Ш. Исланова, Р.Р. Кашапов // Интервал. Передовые нефтегазовые технологии. – 2003. – № 8. – С. 65–67.
7. Пути повышения эффективности предотвращения образования отложений неорганических солей в скважинах / А.Ш. Сыртланов, Р.А. Фасхутдинов, Г.Ш. Шайдулин, Ю.В. Антипин, Н.Р. Яркеева // Нефтяное хозяйство. – 2002. – № 4. – С. 59–61.
8. Кашавцев В.Е. Подбор ингибиторной защиты скважины от солеобразования при добыче нефти // Нефтепромысловое дело. – 1993. – № 607. – С. 21–23.
9. Бриков А.В., Маркин А.Н. Организация системы борьбы с отложением солей на примере нефтяного месторождения Западной Сибири // Нефтепромысловое дело. – 2018. – № 4. – С. 56–61.
10. Кашавцев В.Е. Роль пластовых вод в процессе осадкообразования солей при добыче нефти // Нефть, газ и бизнес. – 2004. – № 1. – С. 42–45.
11. Оценка эффективности ингибирования солеотложения / И.Д. Эшметов, Ш.А. Кулдашева, В.П. Гуро, Д.С. Салиханова // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2016. – № 15. – С. 128–130.
12. Fighting scale – removal and preventing / M. Crabtree, D. Eslinger, F. Fletcher, M. Miller // Oilfield Review. – 2002. – V. 2. – P. 52–73.
13. Jordan M., Mackey J. Scale control in deepwater fields: use interdisciplinary approach to control scale // World Oil. – 2006. – V. 9. – P. 8–12.
14. Bybee K. Scale Cause in the Smorbukk Field // Journal of Petroleum Technology. – 2006. – V. 1. – P. 71.
15. Amiri M., Moghadasi J. Prediction the amount of barium sulfate scale formation in Siri oilfield using OLI ScaleChem Software // Asian Journal of scientific research. – 2010 – V. 3. – P. 230–239.
16. Radler M. Oil production, reserves increase slightly // Oil and Gas Journal. – 2006. – V. 47. – P. 20–21.
17. Christian L. Size distribution of Middle East fields and reserves growth issues draw focus // Oil and Gas Journal. – 2007. – V. 34. – P. 36–41.
18. Belyadi H., Ebrahim F., Belyadi F. Hydraulic Fracturing in Unconventional Reservoirs. – Pittsburgh: Elsevier Science, 2016. – 452 p.
19. Abass A. Corrosion inhibition of offshore oil and gas production facilities using organic compound inhibitors // Journal of Molecular Liquids. – 2017. – V. 248. – P. 775–808.
20. Experimental investigation of inhibitors injection to control salt precipitation using wetted wall column / S. Hosseini, M. Asemani, F. Esmailzadeh, D. Mowla // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2014. – V. 122. – P. 667–674.

Поступила 24.04.2019 г.

Информация об авторах

Яркеева Н.Р., кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Галкова А.Ф., магистр кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.276.72

ANALYSIS OF DEPOSITS OF INORGANIC SALTS IN THE SYSTEM OF COLLECTION OF NSP «B», BPS-5 «A»

Natalia R. Yarkeeva¹,
yarkeevan@yandex.ru

Alsuf F. Galkova¹,
alsugalkova1995@mail.ru

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

Relevance. Currently, the problem of salt deposits formation is very relevant and important. Oil production becomes difficult with the advent of inorganic deposits, which are formed in the well bottom zone, and in the systems for collecting and preparing well products. The consequences of salt deposits are a decrease in the well productivity coefficient, which causes a significant loss of oil. Also, due to insufficient inflow, there is a risk of failure of downhole pumping equipment, a decrease in time between failures of this equipment appears due to occurrence of seizures of electric centrifugal pump and sucker rod pump valves. For these reasons, oil companies suffer significant losses, as large expenditures on measures to prevent and combat salt deposits become necessary.

The aim of the research is to study this problem in details; to identify sediment prevention and control methods; to determine whether a precipitate will fall out as a result of defining the coefficient of supersaturation, by the method of Skilmen–McDnald–Stiff; to analyze the studies in definition of sediments composition.

The methods. The Skilmen–McDnald–Stiff technique was used in calculations. The inorganic part of the sediments was determined by X-ray diffraction on a Shimadzu XRD-6000 powder diffractometer.

The results. Analysis of the results of determining the macro- and microcomponent composition of water showed that the samples of passing-extracted water taken from production wells and automated group metering installation of deposit X contain significant amounts of calcium ions and sulfate ions, which can lead to formation of insoluble salts, such as calcite and plaster. In the wells 5 and 311, the supersaturation coefficient is 1 (there is supersaturation of formation water with gypsum). In these wells, gypsum has the ability to fall out both in volume and on the heat exchange surface itself. In the well 158 the supersaturation coefficient is 1. With unsaturation or formation water, there will be no precipitation in the volume. However, on the heat exchange surface, due to partial evaporation, the solution is especially saturated with gypsum. Because of this, the gypsum is able to be postponed even with some undersaturation of the produced water with it – with a decrease in the coefficient to 0.9. It is necessary to prevent in advance gypsum deposits not to allow them complicating oil production. To prevent deposits formation it is necessary to select an effective inhibitor of scaling for conditions of deposits collecting at NSP «B». To protect the oil gathering system, it is recommended to organize the supply of a scale inhibitor.

Key words:

Deposits, sedimentation, inorganic salts, calcite, gypsum, scale inhibitor.

REFERENCES

- Legai Yu.N., Vanyurikhin I.S., Bishaev D.V., Galiev F.A., Walowski K.V. Use of mechanical methods of preventing salt deposits in wells reservoirs. *Oil industry*, 2015, no. 7, pp. 58–60. In Rus.
- Beshagina E.V., Mozhaikaya M.V. Selection of effective inhibitor of scaling and its concentration in the exploitation of deposits. *Advances in modern science and education*, 2016, no. 12, pp. 76–81. In Rus.
- Aksenov D.A. Well operation in the conditions of salt deposition. *Academic Journal of Western Siberia*, 2016, vol. 12, no. 2, pp. 5. In Rus.
- Shingareva L.A., Maksyutin A.V., Sultanov D.A. How to prevent sludge in the development and exploitation of oil deposits. *Modern problems of science and education*, 2015, no. 1, pp. 336. In Rus.
- Antoniadi D.G., Savenok O.V. The problem of scaling – general principles and features of specific solutions. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban state agrarian University*, 2013, no. 87, pp. 260–275. In Rus. Available at: <http://ej.kubagro.ru/a/viewaut.asp?id=2734> (accessed: 20 April 2019).
- Antipin Yu.V., Yarkeeva N.R., Islanova G.Sh., Kashapov R.R. Increase of efficiency of use of inhibitors of salt deposits. *Interval. Advanced oil and gas technologies*, 2003, no. 8, pp. 65–67. In Rus.
- Syratlanov A.S., Faskhutdinov R.A., Shaydulov G.S., Antipin Yu.V., Yarkeeva N.R. Ways to improve the efficiency of preventing the formation of deposits of inorganic salts in wells. *Oil industry*, 2002, no. 4, pp. 59–61. In Rus.
- Kasantsev V.E. Podbor ingibitorov zashchity skvazhiny ot soledobrazovaniya pri dobyche nefi [Selection of inhibitory protection of wells from the salt formation in oil]. *Oilfield business*, 1993, no. 607, pp. 21–23.
- Brikov A.V., Markin A.D. Organization of the system of salt Deposit control on the example of the oil field of Western Siberia. *Oilfield business*, 2018, no. 4, pp. 56–61. In Rus.
- Kasantsev V.E. The role of reservoir water in the process of sedimentation of salts in the extraction of oil. *Oil, gas and business*, 2004, no. 1, pp. 42–45. In Rus.
- Alhmetov I.D., Kuldashov S.A., Guro V.P., Salyanova D.S. Assessment of the effectiveness of inhibition of scaling. *Fundamental and applied studies in the modern world*, 2016, no. 15, pp. 128–130. In Rus.
- Crabtree M., Eslinger D., Fletcher F., Miller M. Fighting scale – removal and preventing. *Oilfield Review*, 2002, vol. 2, pp. 52–73.
- Jordan M., Mackey J. Scale control in deepwater fields: use interdisciplinary approach to control scale. *World Oil*, 2006, vol. 9, pp. 8–12.
- Bybee K. Scale Cause in the Smorbukh Field. *Journal of Petroleum Technology*, 2006, vol. 1, pp. 71.
- Amiri M., Moghadasi J. Prediction the amount of barium sulfate scale formation in Siri oilfield using OLI ScaleChem Software. *Asian Journal of scientific research*, 2010, vol. 3, pp. 230–239.

16. Radler M. Oil production, reserves increase slightly. *Oil and Gas Journal*, 2006, vol. 47, pp. 20–21.
17. Christian L. Size distribution of Middle East fields and reserves growth issues draw focus. *Oil and Gas Journal*, 2007, vol. 34, pp. 36–41.
18. Belyadi H., Ebrahim F., Belyadi F. *Hydraulic Fracturing in Unconventional Reservoirs*. Pittsburgh, Elsevier Science, 2016. 452 p.
19. Abass A. Corrosion inhibition of offshore oil and gas production facilities using organic compound inhibitors. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, vol. 248, pp. 775–808.
20. Hosseini S., Asemani M., Esmailzadeh F., Mowla D. Experimental investigation of inhibitors injection to control salt precipitation using wetted wall column. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, vol. 122, pp. 667–674.

Received: 24 April 2019.

Information about the authors

Natalia R. Yarkeeva, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Alsu F. Galkova, master, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК: 631.438.2; 544.034.24; 532.5–1/-9

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ОСУШЕНИЯ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯДЕРНО- И РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

Антоненко Михаил Викторович¹,
antonenkov26@mail.ru

Леонов Алексей Вячеславович¹,
leonovav26@mail.ru

Беспала Евгений Владимирович¹,
bespala_evgeny@mail.ru

Чубреев Дмитрий Олегович¹,
d.chubreev@gmail.com

Беспала Юлия Рашидовна¹,
yrbespala@gmail.com

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат»,
Россия, 662972, Красноярский край, г. Железнодорожск, ул. Ленина, 53.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых инновационных неразрушающих технологий восстановления целостности и осушения барьеров безопасности на основе смеси природных глин, создаваемых при выводе из эксплуатации ядерно- и радиационно опасных объектов.

Цель исследования: выявление физико-химических особенностей глиносодержащего барьерного материала, используемого при создании дополнительных барьеров безопасности при выводе из эксплуатации ядерно- и радиационно опасных объектов, а также разработка и апробация способа осушения таких барьеров электроосмотическим методом.

Методы исследования: аналитическое и экспериментальное исследование электроосмотического эффекта, возникающего при осушении барьеров безопасности на основе смеси природных глин.

Результаты. Показано, что используемые при выводе из эксплуатации ядерно- и радиационно опасных объектов барьерные материалы на основе бентонита способны сохранять свои уникальные противодиффузионные и противомиграционные свойства на протяжении всего времени потенциальной опасности объекта. Акцентируется внимание на то, что такие барьеры безопасности могут быть подвержены внешнему негативному воздействию (техногенному или природному), что приводит к частичному ухудшению их противодиффузионных и противомиграционных свойств. Доказано, что для восстановления целостности и работоспособности глиносодержащих барьеров безопасности целесообразно использовать методы, не приводящие к ещё большей деградации барьерного материала. Для этих целей предложено использовать электроосмотический метод, основанный на капиллярном движении влаги в электрическом поле. Указанный электроосмотический метод восстановления глиносодержащих барьеров безопасности позволяет концентрировать влагу возле одного из электродов, тем самым осушать прилегающую область глины. Показано, что эффективнее всего удаляется раствор, имитирующий грунтовые воды из пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов. При напряжении 31,8 В и расстоянии между электродами 40 мм линейная скорость движения влаги составляет 2,5 мм/мин. Это позволяет полностью осушить глиносодержащий барьер безопасности, обводнённый 70 мл раствора, в течение 7–8 часов. Выявлено, что в результате рекомбинации диссоциированных ионов солей и воды на электродах происходит прилипание, спекание и омоноличивание барьерного материала в приэлектродной области. Это позволяет удалить деградированный барьерный материал вместе с электродом. Установлено, что в области концентрирования влаги вблизи катода происходят химические реакции, результатом которых является выделение газообразных продуктов, что позволяет удалять жидкость без использования специальных средств в непрерывном режиме.

Ключевые слова:

Ядерно- и радиационно опасный объект, барьерный материал, природные глины, вывод из эксплуатации, электроосмос, миграция, радионуклид.

Введение

Частью Федеральных целевых программ ФЦП ЯРБ-1 «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» и ФЦП ЯРБ-2 «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года», принятых Правительством Российской Федерации, является вывод из эксплуатации (ВЭ) ядерно- и радиационно опасных объектов (ЯРОО) [1]. К таким объектам, помимо всего про-

чего, относятся: промышленные уран-графитовые реакторы (ПУГР) и приреакторные хранилища твёрдых (ТРО) и жидких (ЖРО) радиоактивных отходов [2, 3]. К настоящему времени на территории РФ расположено 13 ПУГР, из них 11 ПУГР находятся в стадии ВЭ (А, АИ, АВ-1,2,3, И-1, АДЭ-1,3,4,5, АД) [4].

В соответствии с концепцией «Вывод из эксплуатации ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения» вывод из эксплуа-

тации ЯРОО может проводиться по вариантам «Ликвидация» и «Захоронение на месте». ВЭ по варианту «Захоронение на месте» осуществляется путём надёжной изоляции РАО на территории размещения ПУГР, обеспечивающей радиационную безопасность персонала, населения и окружающей среды на весь период потенциальной опасности РАО. При реализации данной концепции непосредственно для основных конструкций реакторных установок (графитовая кладка, несущие металлоконструкции, биологическая защита), относящихся к категории особых РАО и не подлежащих демонтажу и удалению, выполнение указанных требований возможно только при условии создания дополнительных барьеров безопасности, обеспечивающих надёжную изоляцию радионуклидов, содержащихся в материалах и конструкциях захораниваемых реакторных установок.

Искусственные барьеры безопасности на основе природных глин создаются, как правило, с помощью специально разработанной технологии бесполостного заполнения [5]. Такой подход был использован при ВЭ ПУГР ЭИ-2 (г. Северск, Томская область) [6] и АД (г. Железногорск, Красноярский край) [7]. Система захоронения РАО в случае вывода из эксплуатации ПУГР – это совокупность природно-геологических образований (вмещающие и покрывающие породы), шахты УГР и приреакторных помещений (объект захоронения), захораниваемых РАО (облученный графит – основной источник активности) и создаваемых инженерных барьеров безопасности.

При создании пункта консервации «особых» РАО требуется его непрерывный мониторинг с целью перевода в пункт захоронения «особых» РАО. Основным критерием, определяющим возможность такого перевода, является стабильность дополнительных барьеров безопасности в течение всего срока наблюдения. Для этого требуется разработка новых методов и подходов, направленных на поддержание основных функций глиносодержащих барьеров безопасности, и их восстановление в случае природного или техногенного воздействия.

В промышленности, геологии и строительстве широко применяется электроосмотический метод осушения грунта и инженерных сооружений, основанный на явлении движения жидкости через пористые материалы или капилляры при наложении внешнего электрического поля [8–10]. Особенностью используемого при ВЭ ЯРОО глиносодержащего барьерного материала является его способность при нормальных условиях не пропускать жидкость [11, 12]. При обводнении такого барьера происходит образование тонких каналов, которые обладают свойствами капилляров. Следовательно, на жидкость, обводняющую барьерный материал, можно воздействовать внешним электрическим полем. Это создает условия для осушения и восстановления материала барьера.

Поэтому целью настоящего исследования является разработка и апробация способа осушения

барьеров безопасности на основе природных глин, используемых при ВЭ ЯРОО, электроосмотическим методом.

Особенности барьерного материала на основе природных глин

Барьерный материал, используемый при создании дополнительных барьеров безопасности при ВЭ ЯРОО, должен удовлетворять следующим критериям: неселективность при сорбции различных по химическим свойствам радионуклидов; отсутствие компонентов, способных повышать подвижность радионуклидов при эксплуатации барьера; низкая водопроницаемость; стабильность свойств барьера в течение периода эксплуатации; экологическая безопасность; низкие коэффициенты диффузии при нормальных условиях эксплуатации и высокая сорбционная способность по отношению к радионуклидам, в первую очередь, к актинидам и долгоживущим ^{14}C и ^{36}Cl ; стабильность свойств на период сохранения потенциальной опасности РАО; стабильность свойств барьера в различных по уровню водонасыщенности породах; экологическая безопасность; доступность; экономическая обоснованность. Кроме того, глиносодержащий барьерный материал должен быть совместим с геологической средой в местах размещения ЯРОО.

Исследования широкого спектра глинистых композиций привели к выводам, что для надёжной изоляции РАО, образующихся при ВЭ ЯРОО, материал на основе глин должен иметь следующие характеристики [13–15]:

- размер зерен во фракциях, определяющих минералогический состав материала: $<0,01$ мм более 50 % мас.; содержание фракции с размером частиц $<0,005$ мм не менее 40 % мас.;
- емкость катионного обмена (ЕКО) – более 20 мг-экв/100 г материала;
- коэффициент распределения изотопов Pu, Cs, U – более $7 \cdot 10^2$ см³/г;
- содержание фракции с размером частиц $<0,1$ мм – не менее 80 % мас. от общего количества материала;
- фактор задержки (для случая наличия движения влаги в материале – отношение скорости миграции радионуклидов к скорости движения влаги) – не менее 100;
- влажность – не более 3–4 % мас.

В полном объеме требованиям, предъявляемым при создании искусственных барьеров безопасности, отвечают бентонитовые глины, состоящие в основном из монтмориллонита (≥ 60 %) и имеющие в качестве обменного катиона натрия [16]. Бентонитовые глины с другими обменными катионами могут иметь коэффициенты фильтрации (K_f) на два порядка выше. Если для Na-формы $K_f = 9,3 \cdot 10^{-9}$ см/с, то, например, при замене натрия на трехвалентное железо значение коэффициента фильтрации возрастает до $1,1 \cdot 10^{-7}$ см/с [17]. Натрий, находящийся в обменной форме, оказывает наибольшее диспергирующее воздействие, приво-

дающее к уменьшению размера частиц глинистых материалов. Кроме того, обменные катионы влияют на проницаемость пород, регулируя природу и мощность пленок воды, адсорбированных на поверхности глинистых материалов [18]. Мощные слои адсорбированной воды на поверхности чешуек монтмориллонита, насыщенного натрием, препятствуют ее фильтрации вследствие уменьшения диаметра пор и затрудняют движение вдоль поверхности слоя слабо ориентированных молекул адсорбированной воды.

Низкая гидравлическая проводимость является одним из основных требований, предъявляемых к глинистым материалам, используемым для изготовления защитных барьеров безопасности в хранилищах ТРО. Вследствие того, что для изготовления искусственных барьеров, как правило, используются несвязные грунты, их гидравлическая проводимость определяется не только минералогическим составом глин, но и зависит от степени их уплотнения. Уплотнение до $1,3\text{--}1,5\text{ г/см}^3$ не обеспечивает глинам надежной водонепроницаемости. Только уплотненные до $\sim 2,0\text{ г/см}^3$ при оптимальной влажности (16–26 %) все глины становятся влагонепроницаемыми [19]. Однако в действующих хранилищах при изготовлении в них дополнительных барьеров безопасности практически невозможно использовать операции уплотнения глинистых материалов без разборки или перегрузки ТРО. Таким образом, получить водонепроницаемые глины можно только за счет изменения их минералогического состава, например, за счет введения в них модификаторов (например, бентонита). Содержание илистой фракции в образцах должно изменяться от 18 до 28 % мас., тонкопылеватой фракции – от 34 до 50 % мас., то есть значительная часть породы должна состоять из тонкодисперсного материала, катионообменная емкость которого больше 30 мг-экв./100 г породы [6, 20, 21].

Глиносодержащий барьерный материал, удовлетворяющий указанным свойствам, был разработан Институтом физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (г. Москва) совместно с ООО «ПИК» (г. Красноярск) и использовался при выводе из эксплуатации ПУГР на площадках ФГУП «ГХК» (г. Железнодорожск) и АО «СХК» (г. Северск).

Разработка экспериментального стенда

Исходя из анализа теоретических основ процесса капиллярного движения жидкости под действием электрического поля и с учетом особенностей барьерного материала был разработан экспериментальный стенд (рис. 1) для оценки возможности осушения глиносодержащих барьеров безопасности электроосмотическим методом. Барьерный материал – 1 на основе бентонитовой глины, который использовался для создания дополнительных барьеров безопасности при ВЭ ПУГР АД ФГУП «ГХК», размещался внутри прозрачной стеклянной емкости – 2 объемом $0,033\text{ м}^3$. Используемый

барьерный материал – 1 объемом $0,02\text{ м}^3$ выдерживался в емкости – 2 в течение 48 часов при комнатной температуре и атмосферном давлении с целью дополнительного самоуплотнения. После этого производилось измерение плотности и влажности. Плотность глиносодержащего барьерного материала на момент начала экспериментов составляла $1,55\text{ г/см}^3$, а влажность, измеренная многофункциональным измерительным прибором Testo 645, не превышала 3 %.

В барьерный материал – 1, размещенный в стенде-имитаторе ЯРОО – 2, устанавливались перфорированные электроды (3 – анод, 4 – катод), выполненные из высоколегированной стали марки 02Х8Н22С6 (ЭП794). Анод – 3 и катод – 4 соединялись с источником постоянного тока – 5 GPC-3060D марки GW Instek со стабилизацией выходного напряжения, способным создавать разность потенциалов в диапазоне (0,01–32) В. Максимальная сила тока при этом могла достигать до 12 А. Для определения скорости движения влаги стенд-имитатор был снабжен шкалой – 6. Изменение фронта движения жидкости фиксировалось с помощью камеры – 7. При проведении экспериментов в качестве постоянных параметров выбирались: подаваемое на электроды напряжение, объем глиносодержащего барьерного материала, количество обводняющего раствора в начальный момент времени. Изменяемыми параметрами являлись: сила тока, электропроводность глиносодержащего барьерного материала, расстояние между электродами, качественный состав растворов и время проведения эксперимента.

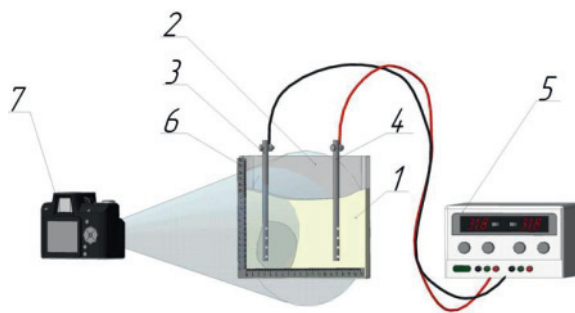


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Scheme of experimental installation

С целью определения скорости электроосмотического движения модельного раствора от одного электрода к другому напротив прозрачной емкости – 2 была установлена цифровая фотокамера, которая фиксировала изменение положения фронта жидкости. В качестве модельных растворов использовалась вода, содержащая соли магния, натрия и кальция. Имитировалась ситуация возможного обводнения пункта приповерхностного захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО) – раствор № 1 и пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) – раствор № 2. Химический состав растворов представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав модельных растворов
Table 1. Chemical composition of standard test solution

Емкость/Tank	Состав/Composition
1	NaHCO ₃
	MgSO ₄ ·7H ₂ O
	CaCl ₂ ·6H ₂ O
	MgCO ₃
2	NaHCO ₃
	MgSO ₄ ·7H ₂ O
	CaCl ₂ ·6H ₂ O

Стоит отметить, что в растворе № 1 содержание NaHCO₃ не превышало 7 мг/л, MgSO₄·7H₂O – <38 мг/л, CaCl₂·6H₂O – 225 мг/л, MgCO₃ – 3 мг/л. В растворе № 2 концентрация NaHCO₃ составляла не более 320 мг/л, MgSO₄·7H₂O – <85 мг/л, CaCl₂·6H₂O – 195 мг/л.

Исследование процесса восстановления глиносодержащих барьеров безопасности

В лабораторных условиях был подготовлен раствор № 1, имитирующий грунтовые воды вблизи одного из ППЗРО. Расстояние между электродами составляло 90 мм. В полый электрод, являющийся анодом, закачивали раствор № 1 и под давлением подавали в перфорированную область. В результате происходило симметричное обводнение электрода. Через 10 минут после обводнения между электродами создавали разность потенциалов 31,8 В. В первые минуты наблюдалось наиболее интенсивное движение фронта жидкости, причём перемещение происходило в строго выделенном горизонтальном направлении от анода к катоду (рис. 2, кривая 1). Линейная скорость движения отстающего фронта в этом случае изменялась в диапазоне (0,9–1,4) мм/мин в первые 10 минут после создания разности потенциалов. Стоит отметить, что, несмотря на силу тяжести, влага практически не распространялась в вертикальном направлении. Объясняется это, во-первых, слоистой структурой глиносодержащего барьера безопасности, а во-вторых, электроосмотическим эффектом, осложнённым диффузией и электромиграцией. Последнее возникало за счёт диссоциации молекул солей (MgSO₄, CaCl₂, MgCO₃, NaHCO₃) на ионы, которые увеличивали подвижность раствора в целом (о чём свидетельствует протекание электрического тока).

Через 20–30 минут после начала ведения процесса линейная скорость движения фронта жидкости снизилась и стабилизировалась. Величина её составила 0,3–0,6 мм/мин. При этом сам фронт выравнивался в вертикальном направлении. Вероятно, это связано с тем, что скорость (линейная и объёмная) лимитировалась количеством подаваемого раствора, а процесс продолжался только при протекании постоянного или возрастающего тока. Для увеличения эффективности рассматриваемого способа необходимо размещать электроды как можно ближе к области обводнения.

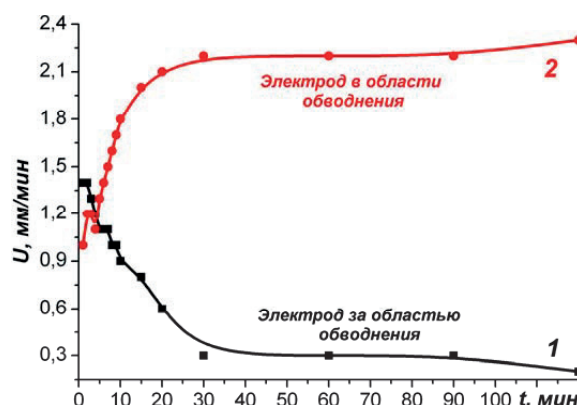


Рис. 2. Изменение скорости движения жидкости между электродами с течением времени: 1 – раствор № 1; 2 – раствор № 2

Fig. 2. Liquid velocity variation in time: 1 – solution № 1; 2 – solution № 2

После завершения процесса осушения барьеров безопасности электроды удалялись из глиносодержащего барьерного материала. При этом наблюдалось спекание, омоноличивание и прилипание глины к аноду. Плотность образованного монолита оценивалась в 2–4 г/см³. Это позволило извлечь электрод с деградированным барьерным материалом.

Образованный на электроде монолит практически не удаляется водой и его разрушение возможно только при механическом воздействии. После очистки электрода наблюдается ярко выраженное изменение его цвета на темно-жёлтый. Изменение цвета носит объёмный характер. Вероятно, это связано с протеканием химических реакций на поверхности электрода, а именно с образованием сульфатов, карбидов и хлоридов металлов, из которых он состоит.

Также в лабораторных условиях был воссоздан раствор, имитирующий грунтовые воды в ППЗРО. Расстояние между электродами в первой серии экспериментов составляло 70 мм, в анод закачивался раствор объёмом 50 мл, разность потенциалов между электродами не превышала 31,8 В. Изображения емкости с обводненным электродом в начальный момент времени и через 120 минут представлены на рис. 3. Как видно из рис. 3, происходило практически симметричное обводнение анода. Суммарная линейная скорость капиллярного, диффузионного и электромиграционного движения жидкости составляла 0,02 мм/мин. Это говорит о том, что барьеры безопасности на основе бентонита сдерживали продвижение раствора, имитирующего грунтовые воды из ППЗРО.

С целью оценки возможности использования электроосмотического эффекта для восстановления барьеров безопасности после обводнения грунтовыми водами из ППЗРО расстояние между электродами было уменьшено до 40 мм (рис. 4, а).

Это привело к возникновению электрического тока, протекающего по всему объёму глины, за-

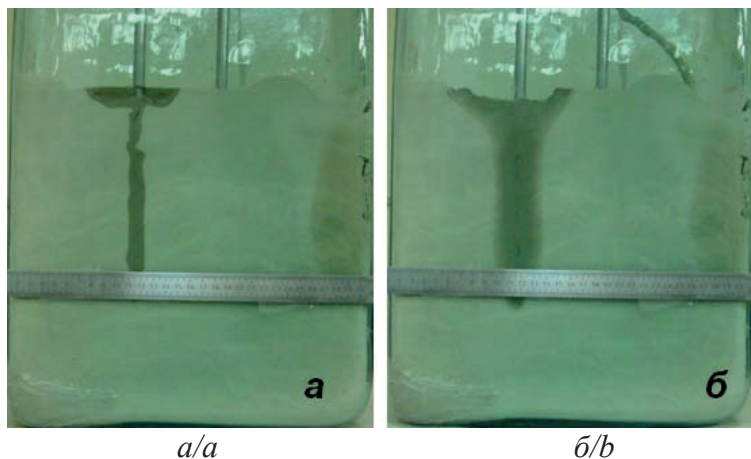


Рис. 3. Состояние барьеров безопасности в момент обводнения водой из ПГЗРО (а) и через 120 минут (б)

Fig. 3. State of safety barriers in time of drowning by water from depth disposal (a) and in 120 minutes (b)

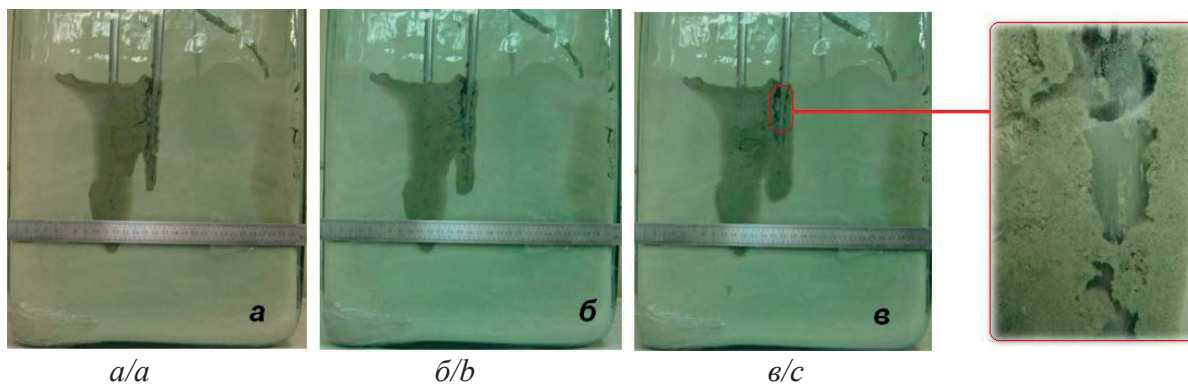


Рис. 4. Состояние барьеров безопасности в различные промежутки времени после перемещения электрода через: а) 1 минуту; б) 10 минут; в) 30 минут

Fig. 4. State of safety barriers in different interval after displacement of electrode in: a) 1 minute; b) 10 minutes; c) 30 minutes

ключенной между электродами. Величина силы тока в первые минуты составила 30–40 мА, через 30 мин – 50–70 мА. Происходило лавинообразное увеличение свободных носителей заряда (ионов солей), в результате чего линейная скорость движения влаги превысила 2,5 мм/мин (рис. 4, б, рис. 2, кривая 2).

Визуально можно было наблюдать, что мелкие гранулы барьерного материала вместе с раствором образовывали макрокапилляры и по ним перемещались в прикатодную область. За первые 30 мин протекания процесса примерно $\frac{1}{2}$ длины катода была обводнена раствором из прианодной области (рис. 4, в). С течением времени происходило повышение уровня жидкости вокруг катода, при этом образовывались полости, через которые можно было удалять жидкость. В прикатодной области наблюдалось интенсивное газообразование, которое приводило к удалению части раствора. При этом область вокруг анода в течение последующих 60–70 мин стала заметно суше.

После проведения экспериментов по осушению глиносодержащих барьеров безопасности проводили оценку изменения фильтрационных и абсорбционных свойств барьерного материала. Для этого

определяли его насыпную плотность ρ , коэффициент фильтрации K_f и коэффициент межфазного распределения K_d до и после процесса осушения барьера безопасности в различных областях лабораторного стенда-имитатора. Области отбора проб показаны на рис. 5.

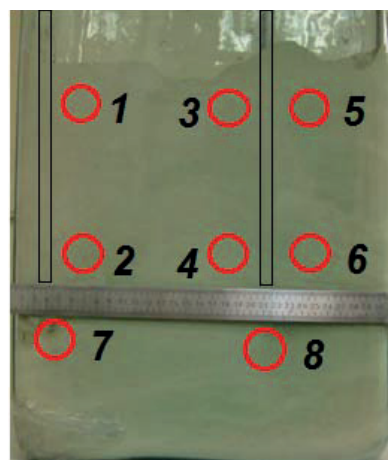


Рис. 5. Области отбора проб осушенного барьерного материала

Fig. 5. Sampling areas of dried barrier material

Пробы исходного глиносодержащего барьерного материала отбирались в областях, указанных на рис. 5. Всего было отобрано 32 пробы на два эксперимента (по 16 на каждый), в которых имитировалось обводнение барьеров безопасности грунтовыми водами в ППЗРО и ПГЗРО. Данные работы проводились для определения влияния вторичного минералообразования в объёме породы между электродами, а также в областях под электродами.

Насыпная плотность барьерного материала ? определялась путем сравнения массы отобранной пробы с её объёмом. Коэффициент фильтрации определяли путем послойного размещения отобранного барьерного материала в стеклянной трубке, её последующего заполнения водой, определения уровня жидкости и границы смачивания породы. Расчет K_{ϕ} проводили по формуле (1):

$$K_{\phi} = \frac{Q}{SI\tau}, \quad (1)$$

где Q – объём воды, см^3 ; S – площадь поперечного сечения стеклянной трубки, см^2 ; τ – время, с; I – гидравлический градиент, определяемый по формуле (2):

$$I = \frac{H}{l}, \quad (2)$$

здесь H – гидравлический напор, см; l – длина пути фильтрации, см.

Площадь поперечного сечения стеклянной трубки, в которой проводили эксперименты по определению коэффициентов фильтрации, составлял $3,14 \text{ см}^2$. Объём воды, подаваемый в верхнюю часть стеклянной трубки, не превышал $15,7 \text{ см}^3$. Время проведения каждого эксперимента составляла 20 суток (1728000 с). Наблюдаемая длина пути фильтрации не превышала $0,1 \text{ см}$ за все время проведения экспериментов.

Также определяли коэффициент межфазного распределения радионуклида ^{137}Cs в глиносодержащем барьерном материале. Для этого отобранные образцы обводняли водой, содержащей известное количество указанного радионуклида, а затем рассчитывали величину K_d по формуле:

$$K_d = \frac{C_n - C_k}{C_k} \cdot \frac{V_{\text{ж}}}{m_{\text{ТВ}}},$$

где C_n и C_k – начальная и конечная концентрация раствора (воды), Бк/л; $V_{\text{ж}}$ – объём раствора (воды), л; $m_{\text{ТВ}}$ – масса глиносодержащего барьерного материала, г.

Перед началом экспериментов по определению коэффициента межфазного распределения K_d проводилось измерение удельной активности радионуклида ^{137}Cs в пробах воды. Значение величины C_n составляло $\sim 2 \text{ кБк/л}$.

Результаты определения насыпной плотности ρ , коэффициента фильтрации K_{ϕ} и коэффициента межфазного распределения K_d до и после осушения материала барьера в различных областях лабораторного стенда-имитатора приведены в таб. 2, 3.

Таблица 2. Результаты определения свойств барьерного материала при обводнении раствором № 1

Table 2. Results of determination of barrier material properties under water invasion by solution no. 1

Область отбора проб Sampling point	$\rho, \text{г/см}^3/\text{г/см}^3$		$K_{\phi}, \text{см/с (cm/s)}$		$K_d, \text{см}^3/\text{г (cm}^3/\text{г)}$	
	до before	после after	до before	после after	до before	после after
1	1,55	1,51	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0	$3,4 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$
2	1,55	1,52	0	0	$3,3 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$
3	1,58	1,52	$0,5 \cdot 10^{-6}$	0	$3,3 \cdot 10^3$	$3,4 \cdot 10^3$
4	1,53	1,52	0	0	$3,7 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$
5	1,54	1,54	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^3$
6	1,60	1,55	0	0	$3,6 \cdot 10^3$	$3,7 \cdot 10^3$
7	1,55	1,59	0	0	$3,3 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^3$
8	1,59	1,59	0	0	$3,3 \cdot 10^3$	$4,1 \cdot 10^3$

Таблица 3. Результаты определения свойств барьерного материала при обводнении раствором № 2

Table 3. Results of determination of barrier material properties under water invasion by solution no. 2

Область отбора проб Sampling point	$\rho, \text{г/см}^3/\text{г/см}^3$		$K_{\phi}, \text{см/с (cm/s)}$		$K_d, \text{см}^3/\text{г (cm}^3/\text{г)}$	
	до before	после after	до before	после after	до before	после after
1	1,53	1,53	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$3,3 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^3$
2	1,53	1,53	0	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$
3	1,55	1,53	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^3$
4	1,55	1,56	0	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^3$
5	1,55	1,56	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^3$
6	1,60	1,56	0	0	$3,3 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^3$
7	1,59	1,58	0	0	$3,4 \cdot 10^3$	$3,8 \cdot 10^3$
8	1,60	1,57	0	0	$3,4 \cdot 10^3$	$3,8 \cdot 10^3$

Из результатов, представленных в табл. 3, 4, видно, что в процессе осушения глиносодержащих барьеров безопасности в лабораторном стенде-имитаторе плотность барьерного материала существенно не меняется. Кроме того, при удалении раствора № 1, имитирующего грунтовые воды вблизи одного из ППЗРО, сохраняются некоторые фильтрационные свойства барьерного материала, а именно коэффициент фильтрации K_{ϕ} . При проведении экспериментов по определению указанного параметра перемещение жидкости в стеклянной трубке практически отсутствовало. Однако при осушении барьеров безопасности, обводнённых раствором № 2, имитирующим грунтовые воды вблизи одного из ПГЗРО, происходило незначительное увеличение коэффициента фильтрации. Особенно это характерно для верхних слоёв глиносодержащего барьерного материала. Возможно, незначительное увеличение K_{ϕ} связано с погрешностью измерений, а также с однократным проведением эксперимента. Стоит обратить внимание, что после осушения глиносодержащих барьеров безопасности происходит незначительное изменение коэффициента межфазного распределения K_d радионуклида ^{137}Cs . При этом в некоторых случаях указанный параметр уменьшается в 1,5 раза (табл. 2, область отбора проб № 2). Однако допустимое изменение величины K_d для рассматриваемого барьерного материала составляет $(2-4) \cdot 10^3 \text{ см}^3/\text{г}$.

Таким образом, при использовании электроосмотического метода для осушения глиносодержащих барьеров безопасности в лабораторных условиях на стенде-имитаторе не было выявлено существенных изменений фильтрационных и абсорбционных свойств, вызванных процессами вторичного минералообразования в объеме породы между электродами. Возможно, описанная тенденция не сохранится при масштабировании эксперимента или проведении процесса осушения в ПГЗРО и ППЗРО. Однако для проверки данного утверждения необходимо проведение отдельных исследований.

Заключение

В работе было показано, что для создания дополнительных барьеров безопасности при ВЭ ЯРОО могут быть использованы барьерные материалы на основе природных глин (например, бентонита). Однако такие барьеры безопасности могут быть подвержены внешнему негативному воздействию (техногенному или природному), что приводит к частичному ухудшению их противотриационных и противомиграционных свойств. Для восстановления целостности и работоспособности глиносодержащих барьеров безопасности целесообразно использовать методы, не приводящие к существенной деградации барьерного материала. Для этих целей возможно использование электроосмотического метода, основанного на капиллярном движении влаги в электростатическом поле. Предложенный электроосмотический метод восстановления глиносодержащих барьеров безопасности позволяет концентрировать влагу возле од-

ного из электродов, тем самым осушая прилегающую область глины.

Показано, что наибольшая скорость удаления влаги достигается в экспериментах с растворами, имитирующими грунтовые воды из ПГЗРО. Так, при напряжении 31,8 В и расстоянии между электродами 40 мм линейная скорость движения влаги составляет 2,5 мм/мин. Это позволяет осушить слой глиносодержащего барьера безопасности, находящийся между электродами в стенде-имитаторе, обводненный 70 мл раствора, в течение 7–8 часов.

Выявлено, что в результате рекомбинации диссоциированных ионов солей и воды на электродах происходит прилипание, спекание и омоноличивание барьерного материала в приэлектродной области. Это позволяет удалить деградированный барьерный материал вместе с электродом. Кроме того, установлено, что в области концентрации влаги вблизи катода происходят химические реакции, результатом которых является выделение газообразных продуктов. Это позволяет удалять жидкость без использования специальных средств в непрерывном режиме.

Таким образом, в ходе настоящей работы была показана возможность применения электроосмотического эффекта для однократного осушения барьеров безопасности, находящихся в стендах-имитаторах хранилищ ЯРОО. Стоит отметить, что представленные результаты получены в лабораторных условиях и для полной оценки эффективности использования данного метода (включая хранилища РАО) требуется проведение экспериментов как минимум на укрупнённых стендах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Updating irradiated graphite disposal: Project «GRAPA» and the international decommissioning network / A. Wickham, H.-J. Steinmetz, P. O'Sullivan, M.I. Ojovan // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2017. – V. 171. – P. 34–40.
2. Радиоактивный реакторный графит. Монография / А.В. Бушнев, А.Ф. Кожин, Е.В. Петрова, В.Н. Зубарев, Т.Б. Алеева, Н.А. Гирке. – М.: Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 2015. – 148 с.
3. IAEA, Processing of Irradiated Graphite to meet Acceptance Criteria for Waste Disposal. Results of a coordinated research project, Technical Report Series. – Vienna: IAEA, 2016. – № 1690. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1790_web.pdf (дата обращения 15.08.2018).
4. IAEA, Progress in Radioactive Graphite Waste Management, Technical Report Series No. 1647. – Vienna: IAEA, 2016. – № 1690. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1790_web.pdf (дата обращения 15.08.2018).
5. Izmetiev A., Pavliuk A., Kotlyarevsky S. Application of void-free filling technology for additional safety barriers creation during uranium-graphite reactors decommissioning // *Advanced Materials Research*. – 2015. – V. 1084. – P. 613–619.
6. Experience of on-site disposal of production uranium-graphite nuclear reactor / A.O. Pavliuk, S.G. Kotlyarevskiy, E.V. Bepala, E.V. Zakharova, V.M. Ermolaev, A.G. Volkova // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2018. – V. 184–185. – P. 22–31.
7. Чубреев Д.О., Кузнецов Г.В. Использование глинистых материалов для создания барьера безопасности выводимого из эксплуатации реактора АД // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 2. – С. 83–87.
8. Кадет В.В., Корюзов П.С. Экспериментальное исследование электроосмотического течения в тонких целевых каналах // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2009. – Т. 50. – № 5. – С. 90–94.
9. Electrodynamics near hydrophobic surface / S.R. Maduar, A.V. Belyaev, V. Lobaskin, O.I. Vinogradova // *Physical review letter*. – 2015. – V. 114. – P. 118301–1–118301–5. DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.118301
10. Сологав В.И. О применении электроосмоса при защите от подтопления земель // *Вестник Омского ГАУ*. – 2017. – № 3 (27). – С. 122–129.
11. Антоненко М.В., Чубреев Д.О., Кузнецов Г.В. Моделирование процесса диффузии радиоуглерода из активной зоны выводимого из эксплуатации ПУГР АД // *Атомная энергия*. – 2015. – Т. 118. – С. 63–68.
12. Сорбционные характеристики материалов фильтрационного барьера в верхних водоносных горизонтах, загрязненных радионуклидами / Н.Д. Андриященко, А.В. Сафонов, Т.Л. Бабич, П.В. Иванов, Ю.В. Коневник, А.А. Кондрашова, И.М. Прошин, Е.В. Захарова // *Радиохимия*. – 2017. – Т. 59. – № 4. – С. 361–370.

13. Experimental simulation of the radionuclide behaviour in the process of creating additional safety barriers in solid radioactive waste repositories containing irradiated graphite / A.O. Pavliuk, S.G. Kotlyarevskiy, E.V. Bespala, E.V. Zakarova, N.I. Rodygina, V.M. Ermolaev, I.M. Proshin, A.G. Volkova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – № 142. – P. 1–7.
14. Моделирование процесса миграции долгоживущих радионуклидов из графитовых радиоактивных отходов / А.О. Павлюк, С.Г. Котляревский, Е.В. Беспала, А.Г. Волкова, Е.В. Захарова, Н.Д. Андриященко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 4. – С. 75–84.
15. Investigation and Modeling of Cesium (I) Adsorption by Turkish Clays: Bentonite, Zeolite, Sepiolite, and Kaolinite / S. Bayulken, E. Bascetin, K. Guclu, R. Apak // Environmental Progress & Sustainable Energy. – 2011. – V. 30. – № 1. – P. 70–80.
16. Сорбционные характеристики апатита и вермикулита по отношению к радионуклидам цезия и стронция / А.А. Кондрашова, Н.Д. Андриященко, Е.В. Захарова, Е.А. Тюпина // Успехи в химии и химической технологии. – 2016. – Т. 30. – № 6 (175). – С. 56–58.
17. О моделировании сорбции стронция на породах в условиях высокой засоленности раствора нитратом натрия / К.А. Болдырев, И.В. Капырин, Л.И. Константинова, Е.В. Захарова // Радиохимия. – 2016. – Т. 53. – № 3. – С. 211–217.
18. Behavior of Cs, Np (V), Pu (IV), and U (VI) in pore water of Bentonite / M.N. Sabodina, S.N. Kalmykov, K.A. Artem'eva, E.V. Zakharova, Yu.A. Sapozhnikov // Radiochemistry. – 2006. – V. 48. – № 5. – P. 488–492.
19. Regularities of the sorption behavior of actinide ions on mineral colloid particles / A.Yu. Romanchuk, S.N. Kalmykov, A.P. Novikov, E.V. Zakharova // Russian Journal of General Chemistry. – 2011. – V. 81. – № 9. – P. 2029–2038.
20. Мартынов К.В., Коневник Ю.В., Захарова Е.В. Барьерные свойства кристаллических горных пород при миграции радионуклидов // Радиохимия. – 2017. – Т. 59. – № 4. – С. 371–378.
21. Взаимодействие радионуклидов с техногенно преобразованными породами / Е.П. Каймин, А.А. Графчиков, Е.В. Захарова, Л.И. Константинова // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2008. – № 1. – С. 29–38.

Поступила 10.12.2018 г.

Информация об авторах

Антоненко М.В., кандидат технических наук, заместитель главного инженера предприятия (энергетика), Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат».

Леонов А.В., директор Реакторного завода, Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат».

Беспала Е.В., кандидат физико-математических наук, ведущий инженер Опытнo-технологической лаборатории Реакторного завода, Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат».

Чубреев Д.О., начальник Опытнo-технологической лаборатории Реакторного завода, Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат».

Беспала Ю.Р., инженер, Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат».

UDC 631.438.2; 544.034.24; 532.5–1/-9

APPLICATION OF ELECTROOSMOTIC EFFECT FOR UNWATERING SAFETY BARRIERS DURING DECOMMISSIONING NUCLEAR LEGACY

Mikhail V. Antonenko¹,
antonenkomv26@mail.ru

Aleksey V. Leonov¹,
leonovav26@mail.ru

Evgeny V. Bospala¹,
bospala_evgeny@mail.ru

Dmitry O. Chubreev¹,
d.chubreev@gmail.com

Yuliya R. Bospala¹,
yrbospala@gmail.com

¹ Mining and Chemical Combine,
53, Lenin street, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the need to develop new innovative non-destructive technologies of integrity reinstating and unwatering safety barriers based on mixture of natural clays, developed during decommissioning nuclear legacy.

The main aim of the study is to detect physical and chemical features of clay-based barrier materials, used at development of additional safety barriers during decommissioning nuclear legacy; as well as to design and implement the method of unwatering such barriers by electroosmotic effect.

The methods: analytical and experimental investigation of the electroosmotic effect occurred under unwatering safety barriers based on mixture of natural clays.

The results. The paper shows that the barrier materials based on bentonite used during decommissioning nuclear legacy are capable of retaining the unique antifiltration and antimigration properties over the time of potential hazard of nuclear legacy object. The attention was accented on the fact that these safety barriers can be subjected to external negative impact (technogeneous or natural), that results in partial degradation of its antifiltration and antimigration properties. It was proved that for integrity reinstating and working capacity of clay-based safety barriers it is appropriate to use the methods not resulting in degradation of barrier material. The authors propose to apply the electroosmotic method based on capillary flow of a fluid in electromagnetic field for these purposes. The stated electroosmotic method of integrity reinstating safety barriers allows accumulating liquid near one of electrode and thereby unwatering the adjacent area of clay. It is shown that the solution imitating groundwater is more effectively removed from clay-based material from deep burial ground of radioactive waste. The linear travel of fluid was approximately 2,5 mm/min at 31,8 V and distance between electrodes about 40 mm. This allows draining completely a clay-based safety barrier, water-encroached by 70 ml of solution during 7–8 hours. The authors revealed the adhesion, sintering and consolidation of barrier material at near-electrode area as a result of recombination of dissociated ions of saline and water on electrodes. This allows removing degraded barrier material coupled with electrode. Chemical reactions occur in the region of fluid accumulation near cathode and gases exude in this area. This allows exhausting liquid from clay without special devices in continuous regime.

Key words:

Nuclear legacy, barrier material, natural clays, decommissioning, electroosmosis, migration, radionuclide.

REFERENCES

- Wickham A., Steinmetz H.-J., O'Sullivan P., Ojovan M.I. Updating irradiated graphite disposal: Project 'GRAPA' and the international decommissioning network. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 171, pp. 34–40.
- Bushuev A.V., Kozhin A.F., Petrova E.V., Zubarev V.N., Aleeva T.B., Girke N.A. *Radioaktivniy reaktorny grafit* [The radioactive reactor graphite]. Moscow, National Research Nuclear University MPhI Publ., 2015. 148 p.
- IAEA, *Processing of Irradiated Graphite to meet Acceptance Criteria for Waste Disposal*. Results of a coordinated research project, Technical Report Series No. 1690. Vienna, IAEA, 2016, No. 1690. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1790_web.pdf (accessed 15 August 2018).
- IAEA, *Progress in Radioactive Graphite Waste Management*, Technical Report Series No. 1647. Vienna, IAEA, 2010, No. 1690.
- Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1790_web.pdf (accessed 15 August 2018).
- Izmetiev A., Pavliuk A., Kotlyarevsky S. Application of void-free filling technology for additional safety barriers creation during uranium-graphite reactors decommissioning. *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1084, pp. 613–619.
- Pavliuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Bospala E.V., Zakharova E.V., Ermolaev V.M., Volkova A.G. Experience of on-site disposal of production uranium-graphite nuclear reactor. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018, vol. 184–185, pp. 22–31.
- Chubreev D.O., Kuznetsov G.V. Using clay materials for developing safety barrier of decommissioning AD reactor. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 2, pp. 83–87. In Rus.
- Kadet V.V., Koryuzlov P.S. Experimental investigation of electroosmotic flow in thin parallel-plate duct. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2009, vol. 50, no. 5, pp. 90–94. In Rus.

9. Maduar S.R., Belyaev A.V., Lobaskin V., Vinogradova O.I. Electrodynamics near hydrophobic surface. *Physical review letter*, 2015, vol. 114, pp. 118301–1–118301–5. DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.118301
10. Sologayev V.I. O primeneni elektroosmosa pri zashchite ot podtopleniya zemel [To application of electroosmosis under underflooding protection]. *Vestnik Omskogo GAU*, 2017, no. 3 (27), pp. 122–129.
11. Antonenko M.V., Chubreev D.O., Kuznetsov G.V. Modeling of radiocarbon diffusion from the active zone of the decommissioned PUGP AD. *Atomic Energy*, 2015, vol. 118, pp. 63–68. In Rus.
12. Andryushchenko N.D., Safonov A.V., Babich T.L., Ivanov P.V., Konevnik Yu. V., Kondrashova A.A., Proshin I.M., Zakharova E.V. Sorption characteristics of the materials of the filtration barrier in the upper aquifers contaminated with radionuclides. *Radiochemistry*, 2017, vol. 59, no. 4, pp. 361–370. In Rus.
13. Pavlyuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Bepala E.V., Zakharova E.V., Rodygina N.I., Ermolaev V.M., Proshin I.M., Volkova A.G. Experimental simulation of the radionuclide behaviour in the process of creating additional safety barriers in solid radioactive waste repositories containing irradiated graphite. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, no. 142, pp. 1–7.
14. Pavlyuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Bepala E.V., Volkova A.G., Zakharova E.V., Andryushchenko N.D. Modelling migration process of long-lived radionuclides from graphite radioactive waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 4, pp. 75–84.
15. Bayulken S., Bascetin E., Guclu K., Apak R. Investigation and Modeling of Cesium (I) Adsorption by Turkish Clays: Bentonite, Zeolite, Sepiolite, and Kaolinite. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2011, vol. 30, no. 1, pp. 70–80.
16. Kondrashova A.A., Andryushchenko N.D., Zakharova E.V., Tyupina E.A. Sorption characteristics of apatite and vermiculite in relation to cesium and strontium radionuclides. *Successes in chemistry and chemical technology*, 2016, vol. 30, no. 6 (175), pp. 56–58. In Rus.
17. Boldyrev K.A., Kapyrin I.V., Konstantinova L.I., Zakharova E.V. About modeling of strontium sorption on rocks under high salinity by sodium nitrate solution. *Radiohimiya*, 2016, vol. 53, no. 3, pp. 211–217. In Rus.
18. Sabodina M.N., Kalmykov S.N., Artem'eva K.A., Zakharova E.V., Sapozhnikov Yu.A. Behavior of Cs, Np (V), Pu (IV), and U (VI) in pore water of Bentonite. *Radiochemistry*, 2006, vol. 48, no. 5, pp. 488–492.
19. Romanchuk A.Yu., Kalmykov S.N., Novikov A.P., Zakharova E.V. Regularities of the sorption behavior of actinide ions on mineral colloid particles. *Russian Journal of General Chemistry*, 2011, vol. 81, no. 9, pp. 2029–2038.
20. Martynov K.V., Konevnik Yu.V., Zakharova E.V. Barrier properties of crystal rocks during radionuclides migration. *Radiohimiya*, 2017, vol. 59, no. 4, pp. 371–378. In Rus.
21. Kaimin E.P., Grafchikov A.A., Zakharova E.V., Konstantinova L.I. Vzaimodeistvie radionuklidov s tekhnogenno preobrazovannymi porodami [Radionuclides interaction with technogenic regenerate rocks]. *Geocology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2008, no. 1, pp. 29–38.

Received: 10 December 2018.

Information about the authors

Mikhail V. Antonenko, Cand. Sc., deputy chief engineer, Mining and Chemical Combine.

Aleksey V. Leonov, works director, Mining and Chemical Combine.

Evgeny V. Bepala, Cand. Sc., lead engineer, Mining and Chemical Combine.

Dmitry O. Chubreev, head of laboratory, Mining and Chemical Combine.

Yuliya R. Bepala, engineer, Mining and Chemical Combine.

УДК 553.7.08:550.4:549(571.55)

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИСТОЧНИКА ЯМКУН (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ)

Соктоев Булат Ринчинович¹,
bulatsoktoev@tpu.ru

Рихванов Леонид Петрович¹,
rikhvanov@tpu.ru

Барановская Наталья Владимировна¹,
nata@tpu.ru

Замана Леонид Васильевич²,
l.v.zamana@mail.ru

Рудмин Максим Андреевич¹,
rudminma@tpu.ru

Эпова Екатерина Сергеевна²,
apikur1@ya.ru

Солодухина Мария Анатольевна²,
mabn@ya.ru

Этенко Константин Александрович³,
konstantin196@gmail.com

Михайлова Лариса Альфредасовна⁴,
mihailova-la@mail.ru

Холмогорова Ирина Владимировна⁵,
kbvl_1@mail.ru

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

² Институт природных ресурсов и криологии Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 672002, г. Чита, ул. Недорезова, 16а.

³ Иркутский государственный университет,
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1.

⁴ Читинская государственная медицинская академия,
Россия, 672000, г. Чита, ул. Горького, 39а.

⁵ Краевой центр медицинской реабилитации «Ямкун»,
Россия, Забайкальский край, Газимуро-Заводский район, с. Ямкун, ул. Рабочая, 1.

Актуальность. Источник Ямкун известен как один из немногих радиоактивных источников на территории Забайкальского края. Его воды ранее использовались для лечения болезни Кашина–Бека (уровской болезни), в настоящее время на его базе функционирует краевой центр медицинской реабилитации для лечения заболеваний костно-мышечной, нервной систем, в том числе ДЦП, а также заболеваний кожи.

Цель: выявление минералого-геохимических особенностей компонентов источника Ямкун.

Объекты: воды озера, ручья, травертины, железистые осадки в русле ручья, солевые отложения на трубе каптажного колодца, растительность (лишайники, мхи, хвоя сосны, листья тополя).

Методы: масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, инструментальный нейтронно-активационный анализ, рентгеновская дифрактометрия, сканирующая электронная микроскопия.

Результаты. Воды источника Ямкун являются гидрокарбонатными кальциево-магниевыми, радиоактивными радоновой природой. Они существенно обогащены Mn, Fe, Be, As, Zr, Cs, Hg, Tl, Li, Co, Ba относительно воды оз. Байкал. Обогащение воды редкими щелочными и щелочноземельными элементами (Li, Be, Cs), а также Hg, Tl, As и Zr позволяет предположить, что их источником являются редкометалльные гранитоиды. При разгрузке вод наблюдается современное минералообразование в виде «ямкунской пены» (арагонит) на поверхности водных ванн, трубах каптажного колодца (несквегонит) и ручье (железистые осадки). Железистые осадки и травертины представлены в основном магниевым кальцитом. При этом в железистых осадках выявлены в больших количествах соединения Fe и Mn, вероятно гидроксиды. В гидроксиде Mn встречаются также соединения Ba, K, Cl, в гидроксиде Fe – As, P, Si, Al. Из редких микровключений в травертинах отмечены интерметаллические соединения Cu и Sn, La–Ce карбонат, а также сульфид As (леллингит?). Установлена унаследованность состава современных железистых осадков и травертинов. Образующиеся травертины обогащены теми же элементами, что и вода в источнике.

Ключевые слова:

Ямкун, минеральные воды, травертины, железистые осадки, минеральный состав, химический состав

Введение

Минеральные источники различного типа привлекают внимание ученых всего мира [1, 2]. Ключевыми вопросами, рассматриваемыми в публикациях, являются: 1) взаимодействие в системе «вода–порода» [3–6]; 2) геохимия широкого

спектра химических элементов в создаваемых экстремальных условиях [7, 8]; 3) минералогия и геохимия формирующихся отложений [9–17].

Район Забайкалья издавна известен своими минеральными источниками различного типа. В начале XX в. профессор И.А. Багашев в своей моно-



Рис. 1. Здание ванного корпуса. Слева от здания среди деревьев находится основной источник в виде небольшого озера

Fig. 1. Bathroom building. The main spring presented by a small lake is located among the trees to the left of the building

графии описывает и показывает на карте 163 минеральных источника, различных по температуре, дебиту и использованию местным населением [18]. Согласно ранее опубликованным работам, данным вопросом на территории региона начали заниматься уже в XVIII в. (И.Г. Гмелин, И.Г. Георги, П.С. Паллас и другие).

В Забайкальском крае наибольшее распространение имеют холодные углекислые источники (80 % от общего количества). Меньше распространены холодные пресные радоновые, железистые и сероводородные воды. К отдельным гидротермальным районам приурочены термальные азотные и азотно-углекислые (север, юго-запад, юго-восток региона), холодные высокоминерализованные и рассольные (Каларский район), холодные сероводородные (Красночикойский район) воды [19–22].

Среди наиболее известных у населения источников Дарасун, Кука, Молоковка, Ямаровка особенно стоит источник Ямкун, уже в начале XX в. отнесенный И.А. Багашевым к числу самых радиоактивных на тот временной период, исключая Молоковку [23].

История минеральных вод Ямкуна (от бурятского «Ям-Гунь» – бездна) берет свое начало с середины XVIII в. [18]. В настоящее время на базе Ямкуна функционирует краевой центр медицинской реабилитации (рис. 1).

В литературе Ямкун описан в трёх вариациях, изложенных в [18]. По первому описанию М.А. Злобина в 1823 г. он представлял источник, залегающий в ноздреватых пепельно-серых известковых породах, под которыми «... лежит иловатая тундристая земля с гальками известняка. Вероятно, что сей водоем есть остаток бывшего в прежние времена горячего ключа ...». Позднее Г.Б. Пранг (1844) характеризует Ямкун следующим образом: «... представляет три водовместности. 1. имеет вид эллипса с длинной осью до трёх

сажень; 2. в двух аршинах от первого, десять вершков в диаметре и 3. в двух сажнях от второго – 1 сажень в диаметре ...». Он также отмечает, что вмещающими породами является известковый туф. Последующее описание в 1868 г., сделанное А.М. Ломоносовым, дает нам представление о том, что длина озера составляет 8 сажень, ширина – 6 сажень. «... Это глубокая яма, трёх сажень глубиной... Вокруг озера значительное количество небольших ямок, из которых бьют ключи, обильные углекислым газом». Перечисленные данные указывают на непостоянное состояние источника, обусловленное в том числе и деятельностью человека.

К XIX в. также относится упоминание так называемой «ямкунской пены», которая представляла собой порошок, собранный с поверхности воды при кипячении и впоследствии высушенный. Он оказывал большой терапевтический эффект при лечении кожных болезней [18].

Целебные свойства воды и порошка позволяют отличить углекисло-железистые воды Ямкуна от других минеральных вод такого типа. Сама вода стала использоваться местными купцами для лечения с 1830 г., а позднее, в 1868 г., источник перешел в Управление Нерчинского горного округа. Со временем Ямкун стал одним из самых посещаемых мест лечения Забайкалья и не только. Особенную популярность он приобрел при лечении болезни Кашина–Бека (уровской болезни): в 1929 г. на его базе была создана Уровская научно-исследовательская станция по изучению этого эндемического заболевания, которая просуществовала до 1993 г. Сегодня на базе источника функционирует краевой центр медицинской реабилитации, специализирующийся на лечении людей с заболеваниями костно-мышечной, нервной систем, в том числе с ДЦП, а также заболеваниями кожи. Эффективность лечения высокая, особенно детей с

ДЦП. В год обслуживается около 1500 человек, из них детей с ДЦП – порядка 200 человек. К сожалению, сегодняшнее экономическое положение данного уникального природного объекта бедственное. А этот уникальный по своим свойствам источник весьма бы пригодился для оздоровления рабочих с новых горнорудных предприятий региона (Быстринский, Ново-Широкинский ГОКи и другие), а также населения при профилактике урвской болезни и для лечения детского церебрального паралича.

Общая характеристика местности

Согласно предыдущим исследованиям, минералого-геохимические особенности источника охарактеризованы в основном с точки зрения химического состава воды. На данный момент опубликовано много гидрогеохимических данных, но они носят разрозненный характер и, соответственно, отсутствует системное описание. Наиболее подробная информация по Ямкуну представлена в работах И.А. Багашева (1905) и в рукописной работе В.А. Кротовой «Минеральные источники Восточного Забайкалья» (1944). Из последних публикаций стоит отметить работы сотрудников Института земной коры СО РАН (г. Иркутск) [24] и Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (г. Чита) [25, 26].

Проведенный в середине XIX в. химический анализ воды озера показывает наличие многих элементов и соединений. Так, А.М. Ломоносов определил в 300 литрах воды содержание Li, Sr, Ba, Cu, Pb, Al_2O_3 , N_2O_5 , Br, F (вероятно фтор). И.А. Багашев в своей книге указывает, что в 1894 г. был проведен химический анализ высушенного при 125 °C порошка, который показал наличие в нем хлора, серного ангидрита, сероводорода, фосфор-

ного ангидрита, уголекислоты, закиси железа, закиси марганца, окиси кальция, окиси магния, окиси калия, окиси натрия, аммиака, органического вещества [18].

Источник Ямкун приурочен к впадине, сложенной известняками и доломитами быстринской свиты нижнего кембрия, которые сверху перекрыты маломощными четвертичными отложениями. По зоне трещиноватости Газимуровский Завод – Ямкун – Корабль – Золь – Уровские Ключи [27] разгружаются воды в виде нескольких источников, образующих цепочку, вытянутую в юго-восточном направлении. Основным источником представляет собой водоём размером 10×20 м, с площадью водной поверхности около 160 м² (рис. 2), из которого вытекает слабопроточный ручей, который теряется у забора, ограждающего территорию санатория. Однако развитие травертинов за забором и дорогой позволяет предположить, что ранее ручей имел большую протяженность, около 250–300 м. В целом современное состояние источника походит на описание, сделанное Г.Б. Прангом [18], разнятся только оценки размеров выходов.

Озеро приурочено к травертинам («туфам» в терминологии И.А. Багашева и других авторов), которые обнажаются на северо-восточном берегу водоема. Выходы травертинов были выявлены также и в других местах. Ряд авторов этот выход травертинов называет куполом в виде пологого конуса, на вершине которого расположено озеро [28].

Вода в озере имеет температуру 20–25 °C и не опускается ниже 10 °C даже в самые сильные морозы [18]. В ручье, который вытекает из источника, температура несколько выше и достигает 30–32 °C, вода в источнике субтермальная.

Периодически в разных местах водоёма вода «вскипает» из-за выделения газов (рис. 3).



Рис. 2. Основной водоем Ямкуна

Fig. 2. Main water reservoir of Yamkun

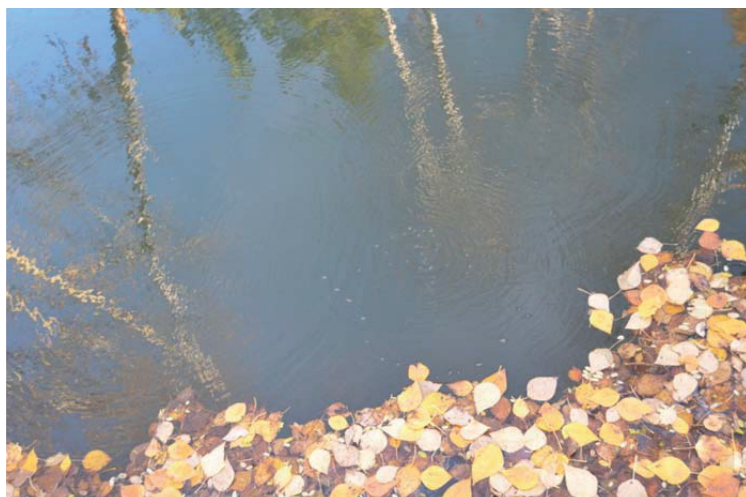


Рис. 3. Выделение газа со дна озера

Fig. 3. Gas release from the lake bottom

Выполненный в 1928 г. газовый анализ проб, о которых сообщает В.А. Кротова (1944), и исследования 2015 г. [24], показывают, что в составе вод источника преобладают N_2 (53,2 % – 1928 г.; 77,9 % – 2015 г.) и CO_2 (46 и 21 %, соответственно). В небольших количествах также обнаружены He , H_2 , O_2 , CH_4 [24].

Воды источника Ямкун являются радиоактивными (рис. 4), природа радиоактивности радоновая. Согласно различным данным, радиоактивность колебалась от 217 до 550 ед. Махе при среднем значении 290 [23] и 286 ед. Махе (П.П. Орлов, устное сообщение), что в системе СИ составляет 2700–2800 Бк/л – такие показатели соответствуют параметрам радиоактивной воды.

Мощность экспозиционной дозы (МЭД), согласно данным сигнализатора-индикатора γ -излучения СИГ-РМ1208 (Белоруссия), колеблется от 0,20 до 0,79 мкЗ/ч. Максимальные значения отмечены в местах интенсивного выпадения железистых осадков в ручье (рис. 5).

Следует отметить, что вода в источнике и каптажном колодце отличается по активности радона: 44 и 110 эман (150 и 468 Бк/л), соответственно. В то же время эти значения намного выше, чем активность вод из скважин, пройденных Сибирской гидрогеологической партией объединения «Лечминресурсы», где она составляла от 1,5 до 9,7 эман [28]. Судя по этим результатам, в данной системе есть несколько источников, обуславливающих по-



Рис. 4. Мощность экспозиционной дозы над ручьём в воздухе на высоте 1 м, мкЗ/ч

Fig. 4. Exposure dose rate in the air above the spring at the height of 1 m, mSv/h



Рис. 5. Железистые осадки в ручье

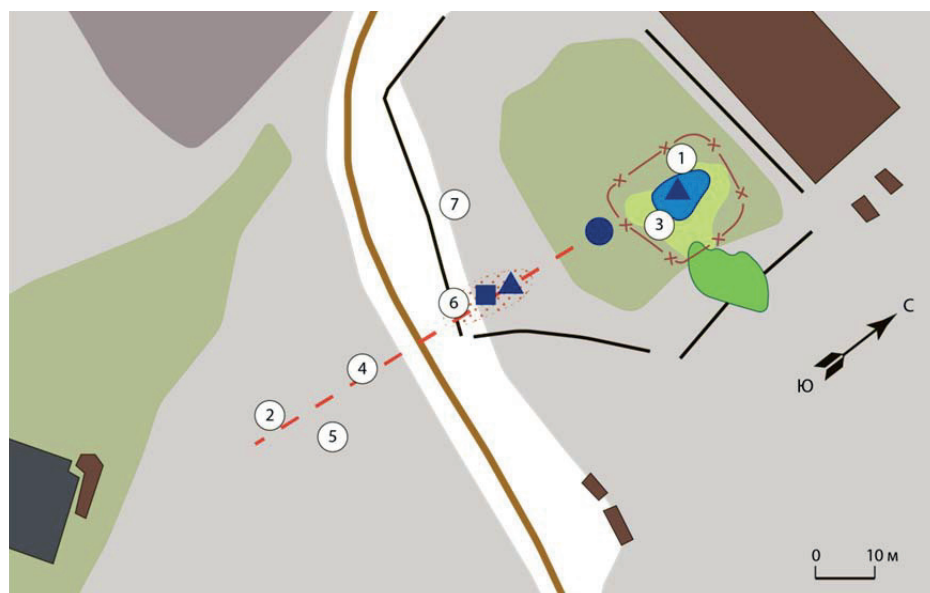
Fig. 5. Ferruginous sediments in the spring

вышенную радиоактивность. Одним из них может являться купол травертинов [27], о чем косвенно свидетельствуют повышенные содержания Ra ($43 \cdot 10^{-10}$ вес. %) в этих породах [28].

Материалы и методы исследования

В сентябре 2017 г. нами были отобраны пробы природных вод из двух источников (озеро, ручей),

выходов травертинов вокруг озера и вдоль ручья, железистых осадков из ручья, солевых отложений, образовавшихся на трубе в каптажном колодце (рис. 6). Дополнительно исследовался солевой осадок в виде порошка, собранный ранее (2014 г.) с поверхности воды в баке, который используется для подогрева воды. Мы полагаем, что это та самая знаменитая «ямкунская пена», о которой упоми-



- | | |
|--|---|
| ① – проба травертинов и ее номер | ⋯ – железистые осадки в тальвеге ручья |
| ▲ – проба воды | — забор |
| ■ – проба железистых осадков | ⊗ – изгородь непосредственно вокруг озера |
| ● – каптажное устройство, на трубе которого отобраны солевые отложения | |

Рис. 6. Схема отбора проб

Fig. 6. Sampling scheme

налось выше. Кроме того, в непосредственной близости к озеру и ручью были отобраны биогеохимические пробы, представленные листьями тополя, хвоей сосны, мхом, лишайниками.

Отобранные пробы были проанализированы современными аналитическими методами в лабораториях Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ).

Анализ природных вод. Анализ проб воды выполнен в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии научно-образовательного центра «Вода» НИ ТПУ (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511901 от 26.09.2018 г.). Элементный состав проб определен методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на масс-спектрометре NexION 300D согласно методике НСАМ 480X (аналитик – Ю.Н. Буткевич). Пробы для анализа предварительно не фильтровались. Всего было проанализировано содержание 71 компонента (без учета гидрогеохимических показателей), при этом содержание P, Sc, V, Ga, Ge, Se, Br, Ag, Cd, Sn, Pr, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Re, Pb, Th оказалось ниже предела определения.

Анализ твердой фазы и биогеохимических проб. Элементный состав отобранных проб был изучен с использованием метода инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) в ядерно-геохимической лаборатории Международного инновационного научно-образовательного центра (МИНОЦ) «Урановая геология» на базе исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т НИ ТПУ (аттестат аккредитации № RA.RU.21AB27 от 27.05.2015 г., аналитики – А.Ф. Судыко, Л.В. Богутская). Плотность потока тепловых нейтронов в канале облучения составляла $2 \cdot 10^{13}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Продолжительность облучения проб 20 часов. Измерение производилось на многоканальном анализаторе импульсов АМА 02Ф с полупроводниковым Ge-Li детектором ДГДК-63А. Было определено содержание 28 химических элементов (Na, Ca, Sc, Cr, Fe, Co, Zn, As, Br, Rb, Sr, Ag, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, Au, Th, U). Метрологические параметры и правильность анализа имеют удовлетворительные параметры.

Вещественный состав образцов травертинов, железистых осадков и солевых отложений был определен методами порошковой рентгеновской дифрактометрии (дифрактометр D2 Phaser, учебно-научная лаборатория оптической и электронной микроскопии МИНОЦ «Урановая геология» НИ ТПУ) и сканирующей электронной микроскопии (микроскоп TESCAN VEGA 3 SBU, отделение геологии Инженерной школы природных ресурсов НИ ТПУ). Параметры съемки на рентгеновском дифрактометре: анод – Cu (медь), напряжение рентгеновской трубки – 30 кВ, ток – 10 мА. Углы съемки 2θ при валовом анализе состава пробы составляли от 8° до 70° , вращение – 10 об./мин, выдержка – 1,5 сек в точке, шаг – $0,02^\circ$. Параметры съемки на сканирующем электронном микро-

пе: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток – 4–12,2 нА. Рентгеноспектральный анализ и определение минеральных микровключений производились на шлифах, покрытых тонким слоем углерода (30 нм), с использованием приставки для рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа OXFORD X-Max 50 с Si/Li кристаллическим детектором.

Результаты и их обсуждение

Общие гидрогеохимические характеристики вод мало отличаются от известных ранее данных. Воды как в озере, так и в ручье являются гидрокарбонатными кальциево-магниевыми (наименование химического состава воды согласно отраслевому стандарту ОСТ 41–05–263–86), минерализация составляет около 2 г/дм³ (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав изученных вод

Table 1. Chemical composition of the studied waters

Место отбора Sampling site	Формула химического состава Chemical composition formula
Озеро Lake	$\text{HCO}_3^- 94,4 \text{ SO}_4^{2-} 5,4$ $\text{Mg}^{2+} 57,4 \text{ Ca}^{2+} 39,7 \text{ Na}^+ 2,2$
Ручей Stream	$\text{HCO}_3^- 95,0 \text{ SO}_4^{2-} 4,9$ $\text{Mg}^{2+} 58,5 \text{ Ca}^{2+} 38,5 \text{ Na}^+ 2,3$

Содержания Fe (1,4–2,9 мг/дм³) и Si (11,6–11,8 мг/дм³), по данным ICP-MS, не достигают принятых бальнеологических норм для отнесения к лечебным по этим показателям (10 и 18 мг/дм³, соответственно), поэтому воду нельзя отнести ни к одному из выделенных в ГОСТ Р 54316–2011 бальнеологическому типу углекислых вод Забайкалья (дарасунский, кукинский). Ее основным лечебным фактором служит углекислота и радон. Но для пациентов, страдающих от уральной болезни, очевидно особое значение имеет высокое содержание кальция в воде.

Выполненное нормирование относительно воды из оз. Байкал [29] показывает, что для ряда компонентов (Mn, Fe, Be, As, Zr, Cs, Hg, Tl) характерны коэффициенты концентрации (КК) более 100. Близкие к 100 КК наблюдаются также для Li, Mg, Co (рис. 7). Этот геохимический спектр уникален по своим ассоциациям: с одной стороны, мы наблюдаем Fe, Mn, Mg, с другой стороны – редкие щелочные и щелочноземельные элементы (Li, Be, Cs). Также примечательной является третья группа элементов (Hg, Tl, As). Особняком выглядит Zr, но с точки зрения возможных источников поступления химических элементов в воду, он помогает понять их происхождение. С большой долей вероятности таковыми являются редкометалльные гранитоиды. Об этом же могут свидетельствовать высокие КК ряда редкоземельных элементов.

Из вод озера в дальнейшем на трубе в каптажном колодце выпадают солевые отложения, а также образуется в виде налета так называемая «пена». Кроме того, в ручье наблюдается выпадение железистых осадков.

Рентгенофазовый анализ показывает, что травертины в основном сложены магнезиальным кальцитом с примесями арагонита и кварца, за исключением пробы № 2, в составе которой выявлены также альбит, микроклин и мусковит (табл. 2). «Пена» на 100 % состоит из арагонита, а солевые отложения на трубе в каптажном колодце представлены достаточно редким минералом – несквегонитом, водным карбонатом магния ($MgCO_3 \cdot 3H_2O$).

Таблица 2. Минеральный состав проб

Table 2. Mineral composition of the samples

Пробы Samples	Минералы/Minerals, %						
	Кальцит магнезиальный Mg calcite	Арагонит Aragonite	Кварц Quartz	Альбит Albite	Микроклин Microcline	Мусковит Muscovite	Несквегонит Nesquehonite
1	88,2	10,2	1,6	–	–	–	–
2	24,0	–	19,9	20,4	23,1	12,6	–
3	81,4	18,6	–	–	–	–	–
4	84,8	15,2	–	–	–	–	–
5	94,9	4,3	0,8	–	–	–	–
6	89,3	8,9	1,8	–	–	–	–
7	98,5	–	1,5	–	–	–	–
8	–	100	–	–	–	–	–
9	–	–	–	–	–	–	100
10	97,9	–	2,1	–	–	–	–

Примечание: 1–7 – травертины; 8 – «пена»; 9 – солевые отложения на трубе; 10 – железистые осадки в ручье.

Note: 1–7 – travertines; 8 – «foam»; 9 – salt deposits on the tube; 10 – ferruginous deposits in the spring.

Полученные данные ИНАА свидетельствует о выдержанном элементном составе образцов травертинов, «пены», солевых отложений и железистых осадков (табл. 3). Среди проб травертинов необходимо обратить внимание на пробу 2, где содержания Zn, Rb, Th, редкоземельных элементов максимальны для данной выборки. Для «пены» характерно максимальные содержания Sr (1431 г/т) и U (13,6 г/т), а также повышенные концентрации As, Се. Для солевых отложений с трубы каптажного колодца не выявлено значимых концентраций изученных химических элементов, за исключением Au, содержание которого на порядок выше, чем в других образцах. Весьма интересно с геохимической точки зрения смотрятся железистые осадки, выпадающие в ручье. Для данных отложений характерно максимальное содержание Fe – 9,9 %, а также Co (175,9 г/т), As (2305,6 г/т), Br (6,3 г/т), Sb (156,5 г/т). Практически такой же спектр химических элементов (Co, As, Sb, Ba) в повышенных концентрациях выявлен в образце травертина, отобранном в непосредственной близости (проба № 6).

В целом выходы травертинов на источнике Ямкун формируют значительное по площади поле и характеризуются различными текстурно-структурными особенностями (рис. 8). Текстура породы ячеисто-скорлуповатая, кавернозная, пористая. Окраска изменяется от темно-серой до светло-серой, иногда белесой. В отдельных случаях наблюдаются полосчатые горизонты, обусловленные чередованием светлых и темных разностей пород. В проходящем свете видно, что темная окраска определяется большим количеством органического вещества, гидроокислов Fe и Mn. В ряде случаев на удалении от источника наблюдается метасоматическое замещение осадочных пород (гравелитов) карбонатным материалом. При этом отчетливо наблю-

даются выходы травертинов на источнике Ямкун формируют значительное по площади поле и характеризуются различными текстурно-структурными особенностями (рис. 8). Текстура породы ячеисто-скорлуповатая, кавернозная, пористая. Окраска изменяется от темно-серой до светло-серой, иногда белесой. В отдельных случаях наблюдаются полосчатые горизонты, обусловленные чередованием светлых и темных разностей пород. В проходящем свете видно, что темная окраска определяется большим количеством органического вещества, гидроокислов Fe и Mn. В ряде случаев на удалении от источника наблюдается метасоматическое замещение осадочных пород (гравелитов) карбонатным материалом. При этом отчетливо наблю-

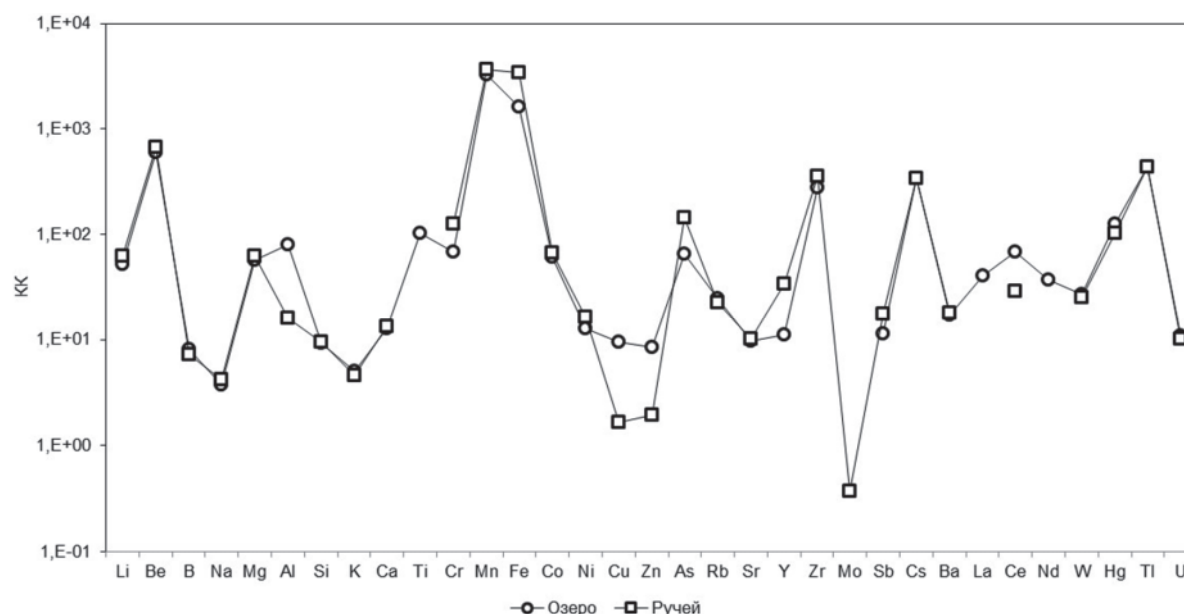


Рис. 7. Нормированные на средний состав байкальской воды спектры содержания химических элементов в изученных водах. Примечание: КК – коэффициент концентрации относительно среднего состава байкальской воды [29]

Fig. 7. Spectra of chemical elements in studied waters normalized by the average composition of Lake Baikal water. Note: KK is the concentration coefficient relative to the average composition of Lake Baikal water [29]

Таблица 3. Элементный состав травертинов и различных отложений из вод по данным ИНАА, г/т

Table 3. Element composition of the travertines and various deposits, precipitated out of the water, according to INAA, ppm

Элемент Element	Пробы/Samples									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na	220	160	140	200	520	8180	330	220	190	950
Ca	239700	259800	269400	295800	243300	155900	259500	285500	4090	170800
Sc	0,295	0,219	0,214	0,131	0,601	1,443	0,550	0,238	0,063	0,752
Cr	9,97	10,03	10,81	11,82	69,44	58,93	24,35	4,33	0,87	3,78
Fe	4640	8500	8890	1130	34310	13250	23190	5110	780	98520
Co	17,5	38,1	10,7	0,765	67,4	13,9	51,6	1,023	0,379	175,9
Zn	30,8	23,6	17,2	62,3	53,2	674,6	82,7	25,9	8,7	86,5
As	74,3	195,9	209,4	8,3	950,0	133,0	616,0	82,7	21,4	2305,6
Br	1,312	1,226	1,230	0,422	2,945	1,099	2,113	0,221	0,779	6,262
Rb	1,05	<2	<2	1,48	<2	70,0	<2	<2	2,00	<2
Sr	430,4	247,9	470,9	387,6	400,8	400,0	292,6	1431,3	21,4	351,8
Ag	<0,7	<0,7	46,7	<0,7	<0,7	<0,7	<0,7	<0,7	5,1	<0,7
Sb	5,81	11,67	7,19	0,58	44,85	15,28	24,68	2,91	3,08	156,5
Cs	0,311	0,158	0,053	0,255	0,941	0,114	0,438	0,174	0,172	0,157
Ba	237,3	622,0	227,9	43,5	874,4	384,9	663,8	226,8	30,7	1228,1
La	0,535	0,204	0,256	0,381	1,212	7,967	1,092	0,545	0,187	2,021
Ce	2,96	1,67	1,56	1,93	4,44	21,5	3,70	5,14	1,87	5,11
Nd	3,57	6,49	4,30	2,68	4,01	8,52	<1	7,02	1,32	<1
Sm	0,131	0,075	0,064	0,082	0,205	1,319	0,265	0,124	0,034	0,548
Eu	0,015	0,038	0,004	0,008	0,031	0,286	<0,02	0,021	0,001	0,024
Tb	0,006	0,006	<0,1	0,008	<0,1	0,183	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Yb	0,097	0,064	0,080	0,036	0,168	0,620	0,213	0,086	0,023	<0,8
Lu	0,030	0,022	0,025	0,026	0,045	0,074	0,033	0,098	0,031	0,092
Hf	<0,5	0,103	<0,5	0,051	<0,5	1,275	<0,5	0,132	0,045	<0,5
Ta	<0,08	0,007	<0,08	<0,08	<0,08	0,359	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08
Au	0,006	0,0001	<0,003	<0,003	0,002	0,004	<0,003	0,005	0,011	<0,003
Th	0,225	0,088	0,068	0,123	0,249	2,450	0,144	0,214	0,199	0,234
U	2,17	2,20	2,60	3,51	3,15	1,78	2,36	13,6	4,29	2,90

Примечание: «<» – ниже предела обнаружения; 1–7 – травертины; 8 – «пена»; 9 – солевые отложения на трубе; 10 – железистые осадки в ручье.

Note: «<» – below detection limit; 1–7 – travertines; 8 – «foam»; 9 – salt deposits on the tube; 10 – ferruginous deposits in the spring.

даются реликты незамещенных галек, представленных кварцем, полевыми шпатами (рис. 8, d).

Минеральный состав травертинов выдержан (табл. 2): во всех пробах преобладает магнезиальный кальцит (81–94 %), присутствует арагонит (4–15 %) и в ряде образцов кварц (0,8–1,6 %). По нашему мнению, кварц является реликтовым, так же как в образце № 2, в котором обнаружены окатанные обломки кварца и полевых шпатов (табл. 2).

В геохимическом аспекте все разнообразие травертинов достаточно выдержано. В образцах, более обогащенных гидроксидами Fe и Mn (проба № 6), фиксируются высокие значения Cr, Co, As, Sb, Ba. В образце с сохранившимися реликтами исходных пород (гравелиты) отмечается повышенное содержание Na, Zn, Cr, редкоземельных элементов и пониженное содержание Ca (табл. 3).

Электронно-микроскопические исследования образцов травертинов, железистых осадков, «пены» и солевых отложений на трубе каптажного колодца позволили выявить ряд минералов-концентраторов химических элементов. Наиболее «богатыми» в минеральном составе оказались железистые осадки, образующиеся в ручье.

Основная масса железистых осадков на 80–90 % сложена карбонатом Ca (до 38,6 мас. %) с примесями Mg (до 1,8 мас. %), что подтверждает

данные рентгеновской дифрактометрии. Иногда в этих осадках наблюдается некоторая зональность (рис. 9, a).

В пространстве между агрегатами карбоната, а иногда в виде концентрически-зональных корковых, коллоидных образований встречаются соединения Mn (вероятно, гидроксиды) с различным набором примесных элементов. Так, в сфероиде (рис. 9, b) содержание Mn по данным рентгеноспектрального анализа составляет 38,8–40,5 мас. %. В виде примеси в нем фиксируются Fe (0,4–5,6 мас. %), Ba (1,1–1,4 мас. %), K (0,3–0,7 мас. %), Cl (0,1–0,4 мас. %), Na (0,3 мас. %).

Соединения Fe (вероятно, гидроксиды) образуют более неправильные агрегаты, в которых его содержание колеблется от 23,3 до 50,5 мас. %. В микровключениях практически всегда встречаются As (0,4–1,5 мас. %), а также P (0,3–0,9 мас. %), Si (0,9–1,5 мас. %), Al (1,0–1,5 мас. %), Mn (0,7 мас. %) (рис. 9, c).

В отдельных случаях в микровключениях Fe фиксируется F (до 1,6 мас. %), Si (2,8 мас. %), Al (0,4 мас. %) и не обнаруживаются другие примесные элементы, характерные для гидроксидов. Возможно, что в данном случае мы имеем дело с реликтовым магнетитом первичных пород (рис. 9, d).

В образцах также обнаружена разновидность Fe-содержащего минерала с Ti: Fe – 23 мас. %, Ti –

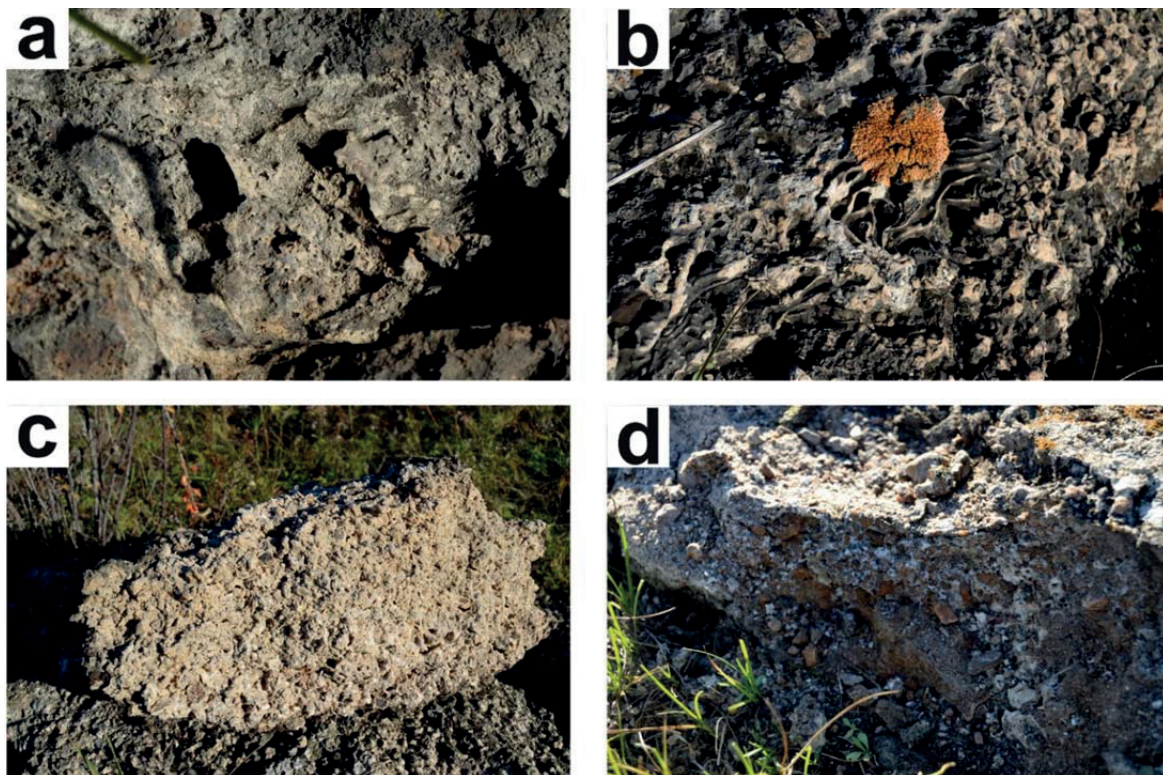


Рис. 8. Текстурно-структурные особенности травертинов: а) серые, пепельно-серые до темно-серых массивные слабо пористые кавернозные породы с налетом Fe-Mn образований; б) темно-серый с участками светло-серого цвета, кавернозный, неравномерно ячеистый, размер ячеек до 3–5 см; в) темно-серый (внизу) и светло-серый слабо пористый; д) замещение гравелистых осадков карбонатным материалом, обломки размером до 2 см, хорошо окатаны и представлены кварцем и полевыми шпатами

Fig. 8. Textural and structural features of travertines: а) gray, ash gray up to dark gray massive weakly porous cavernous rocks with a patina of Fe-Mn sediments; б) dark gray with parts of light gray, cavernous, unevenly cellular, cell size up to 3–5 cm; в) dark gray (bottom part) and light gray slightly porous; д) replacement of gravel sediments with carbonate material, fragments up to 2 cm, well rounded and represented by quartz and feldspars

16,1 мас. %, Si – 9,7 мас. %. Данный минерал, вероятно, также является реликтом обломочных пород (рис. 9, е).

Иногда в железистом осадке отмечаются интерметаллические соединения Cu (81,4 мас. %) и Sn (15,7 мас. %) с примесью Fe (1,4 мас. %) и Ca (0,8 мас. %). Нельзя исключить техногенное происхождение данного материала, но следует отметить факт его обнаружения и присутствия в нем Fe и Ca – элементов, характерных для травертинов.

Травертины имеют тот же состав, что и слаболигитированные железистые осадки, и сложены преимущественно карбонатом Ca (26–36 мас. %) с примесью Mg (0,8–1,5 мас. %). На его долю приходится 80–90 % всей матрицы породы. Поры в породе заполнены соединениями Mn (11,3–36,7 мас. %) и Fe (4,2–7,9 мас. %) (рис. 10, а), в которых также встречаются элементы, обнаруженные и в железистых осадках: Ba (0,8–2,6 мас. %), K (0,1–0,6 мас. %), Cl (0,1–0,4 мас. %), Na (0,5–0,9 мас. %), P (0,2 мас. %), следовые концентрации S. Это свидетельствует, во-первых, об унаследованности состава железистых осадков и травертинов, во-вторых, о том, что процесс травертинообразования проявляется и в настоящее время.

Небезынтересно отметить, что в травертинах нами обнаружен сульфид As (As – 60,5 мас. %, Fe – 36,4 мас. %) типа лёллингита (рис. 10, б), редкоземельный карбонат (Ce – 38,7 мас. %, La – 30 мас. %, Ca – 3,6 мас. %, Fe – 0,7 мас. %) (рис. 10, в), циркон (Zr – 51,8 мас. %, Si – 15,8 мас. %, Hf – 1,8 мас. %), по-видимому, имеющих терригенное происхождение (рис. 10, д).

Так называемая «ямкунская пена» и солевые отложения, отобранные на трубе каптажного колодца, по данным сканирующей электронной микроскопии характеризуются также достаточно однородным составом: карбонат Ca («пена») и Mg (солевые отложения) (рис. 11, а, б). Из интересных находок стоит отметить обнаружение в «пене» карбоната Ca-Fe (Ca – 21,7 мас. %, Fe – 20,1 мас. %), который формирует почкообразные агрегаты (рис. 11, в). В солевых отложениях нами зафиксирован сульфат Ba (барит?) (рис. 11, д).

Изучение биологических материалов (лишайники, мхи, хвоя сосны, листья тополя), отобранных в непосредственной близости к озеру и ручью, показывает, что для них характерны повышенные концентрации U, вероятно, обусловленные влиянием вод.

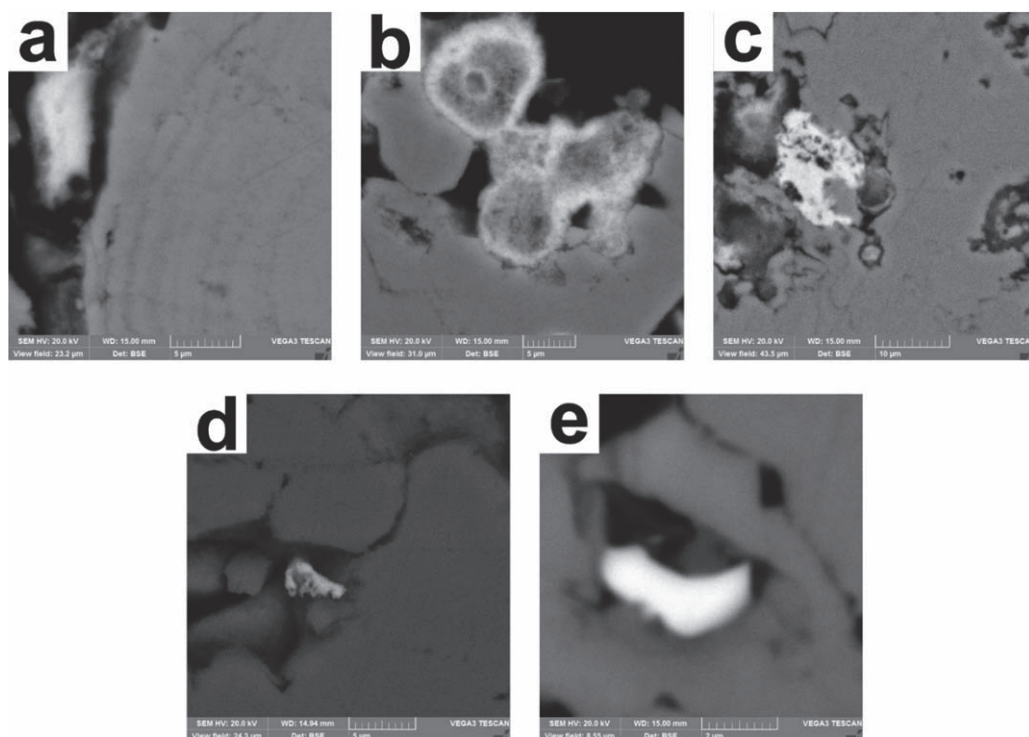


Рис. 9. СЭМ-изображения железистых осадков из ручья и микровключений в их составе: а) зональность; б) соединения Mn (сфероид); с) соединения Fe (гидроксиды); d) соединения Fe (реликты); e) Fe-Ti соединение

Fig. 9. SEM-images of ferruginous deposits in the spring and microinclusions in these deposits: a) zonal sequence; b) Mn compounds (spheroid); c) Fe compounds (hydroxides); d) Fe compounds (relics); e) Fe-Ti compound

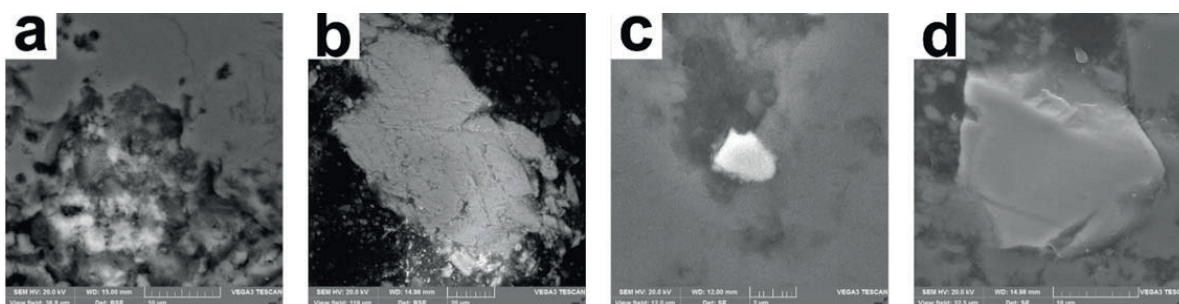


Рис. 10. СЭМ-изображения микровключений в травертинах: а) соединение Mn и Fe; б) сульфид As; в) карбонат La-Ce; d) циркон

Fig. 10. SEM-images of microinclusions in travertines: a) Mn and Fe compound; b) As sulfide; c) La-Ce carbonate; d) zircon

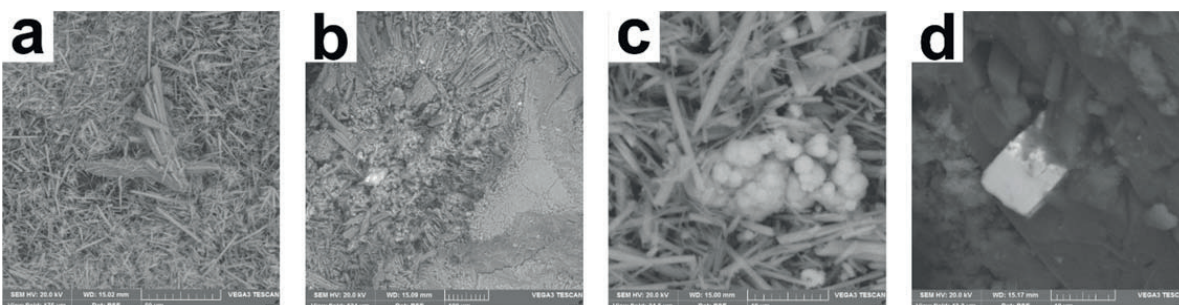


Рис. 11. СЭМ-изображения «пены», солевых отложений с трубы каптажного колодца и микровключений в их составе: а) общий вид «пены»; б) общий вид солевых отложений; в) карбонат Ca-Fe; d) сульфат Ba

Fig. 11. SEM-images of «foam», salt deposits on the tube of soak well and microinclusions in these deposits: a) general view of «foam»; b) general view of salt deposits; c) Ca-Fe carbonate; d) Ba sulfate

Заключение

Исследование источника Ямкун, воды которого широко использовались как эффективное терапевтическое средство при лечении болезни Кашина–Бека (уровская болезнь), показало, что субтермальные воды являются гидрокарбонатными кальциево-магниевыми, радиоактивными радоновой природы. Они существенно обогащены Mn, Fe, Be, As, Zr, Cs, Hg, Tl, Li, Co, Ba относительно воды оз. Байкал.

Геохимический спектр воды уникален по своим ассоциациям: с одной стороны, Fe, Mn, Mg, с другой стороны, редкие щелочные и щелочноземельные элементы (Li, Be, Cs). Также примечательной является третья группа элементов (Hg, Tl, As). Особняком выглядит Zr, но с точки зрения возможных источников поступления химических элементов в воду он помогает понять их происхождение. С большой долей вероятности таковыми являются редкометалльные гранитоиды.

Разгрузка вод на поверхность приводит к процессам современного минералообразования: в водных ваннах – «ямкунская пена» (арагонит), на трубах каптажного колодца (несквегонит) и в русле рус-

чья (железистые осадки). Железистые осадки представлены магниальным кальцитом, насыщенным соединениями Fe и Mn, вероятно гидроксидами. В гидроксидах Mn встречаются Ba, K, Cl, в то время как в гидроксидах Fe – As, P, Si, Al. Такой же минеральный состав характерен для травертинов. Из редких микровключений в них следует отметить интерметаллические соединения Cu и Sn, La–Ce карбонат, а также сульфид As (леллингит?).

Установлена унаследованность состава железистых осадков и травертинов. Образующиеся травертины обогащены теми же элементами, что и вода в источнике. Процесс травертинообразования проявляется и в настоящее время. Субтермальные воды создают условия для метасоматического замещения осадков.

Таким образом, лечебные свойства вод определяются комплексным характером воздействия самих вод, присутствием радона и растворенных микрокомпонентов, а также терапевтическими свойствами ландшафта.

Научные исследования выполнены в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thermal and Mineral Waters: Origin, Properties and Applications / eds. W. Balderer, A. Porowski, H. Idris, J.W. LaMoreaux. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – 135 p.
2. Mineral and Thermal Waters of Southeastern Europe / ed. by P. Papic. – Cham: Springer International Publishing, 2016. – 171 p.
3. The origin of geothermal waters in Morocco: Multiple isotope tracers for delineating sources of water-rock interactions / L. Bouchaou, N.R. Warner, T. Tagma, M. Hssaisoune, A. Vengosh // Applied Geochemistry. – 2017. – V. 84. – P. 244–253.
4. Chenaker H., Houha B., Vincent V. Hydrogeochemistry and geothermometry of thermal water from north-eastern Algeria // Geothermics. – 2018. – V. 75. – P. 137–145.
5. Okan Ö.Ö., Kalender L., Çetindag B. Trace-element hydrogeochemistry of thermal waters of Karakoçan (Elazığ) and Mazgirt (Tunceli), Eastern Anatolia, Turkey // Journal of Geochemical Exploration. – 2018. – V. 194. – P. 29–43.
6. Geochemistry of the thermal waters in Jiangxi Province, China / S.L. Shvartsev, Z. Sun, S.V. Borzenko, B. Gao, O.G. Tokarenko, E.V. Zippa // Applied Geochemistry. – 2018. – V. 96. – P. 113–130.
7. Geochemistry of thermal waters of continental margin of Far East of Russia / I.V. Bragin, G.A. Chelnokov, O.V. Chudaev, N.A. Kharitonova, S.V. Vysotskiy // Acta Geologica Sinica – English Edition. – 2016. – V. 90. – № 1. – P. 276–284.
8. Geochemistry of Zr, Hf, and REE in a wide spectrum of Eh and water composition: The case of Dead Sea Fault system (Israel) / P. Censi, M. Raso, Y. Yechieli, H. Ginat, F. Salano, P. Zuddas, L. Brusca, W. D'Alessandro, C. Inguaggiato // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2017. – V. 18. – № 3. – P. 844–857.
9. Lavrushin V.Yu., Kuleshov V.N., Kikvadze O.E. Travertines of the northern Caucasus // Lithology and Mineral Resources. – 2006. – V. 41. – № 2. – P. 137–164.
10. Stable isotope geochemical study of Pamukkale travertines: New evidences of low-temperature non-equilibrium calcite-water fractionation / S. Kele, M. Özkul, I. Förlis, A. Gökgöz, M.O. Baykara, M.C. Alçiçek, T. Németh // Sedimentary Geology. – 2011. – V. 238. – № 1–2. – P. 191–212.
11. Comparison of the Quaternary travertine sites in the Denizli extensional basin based on their depositional and geochemical data / M. Özkul, S. Kele, A. Gökgöz, Ch.-Ch. Shen, B. Jones, M.O. Baykara, I. Förlis, T. Németh, Yu.-W. Chang, M.C. Alçiçek // Sedimentary Geology. – 2013. – V. 294. – P. 179–204.
12. Mineralogical–geochemical features of travertines of the modern continental hydrotherms: A G-1 well, Tunka depression, Baikal rift zone / B.R. Soktoev, L.P. Rikhvanov, S.S. Ilenok, N.V. Baranovskaya, T.T. Taisaev // Geology of Ore Deposits. – 2015. – V. 57. – № 4. – P. 331–347.
13. A global review on ambient Limestone-Precipitating Springs (LPS): Hydrogeological setting, ecology, and conservation / M. Cantonati, S. Segadelli, K. Ogata, H. Tran, D. Sanders, R. Gerecke, E. Rott, M. Filippini, A. Gargini, F. Celico // Science of the Total Environment. – 2016. – V. 568. – P. 624–637.
14. Origins of elements building travertine and tufa: New perspectives provided by isotopic and geochemical tracers / P.-A. Teboul, C. Durlet, E.C. Gaucher, A. Virgone, J.-P. Girard, J. Curie, B. Lopez, G.F. Camoin // Sedimentary Geology. – 2016. – V. 334. – P. 97–114.
15. Geochemistry and Stable Isotopes of Travertine from Jordan Valley and Dead Sea Areas / K.M. Ibrahim, I.M. Makhoul, A.R.E. Naqah, S.M. Al-Thawabteh // Minerals. – 2017. – V. 7. – № 7. – Article number 82.
16. Jones B. Review of calcium carbonate polymorph precipitation in spring systems // Sedimentary Geology. – 2017. – V. 353. – P. 64–75.
17. Jones B. Review of aragonite and calcite crystal morphogenesis in thermal spring systems // Sedimentary Geology. – 2017. – V. 354. – P. 9–23.
18. Багашев И.А. Минеральные источники Забайкалья: Приложение к Запискам Читинского отделения Приамурского отдела Российского географического общества. – М.: Изд-во М.Д. Бутина, 1905. – 159 с.
19. Минеральные воды южной части Восточной Сибири. – М.; Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1961. – Т. 1. – 345 с.
20. Минеральные воды южной части Восточной Сибири. – М.; Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. – Т. 2. – 199 с.

21. Малая энциклопедия Забайкалья: природное наследие / гл. ред. Р.Ф. Гениатулин. – Новосибирск: Наука, 2009. – 698 с.
22. Замана Л.В. Гидроминеральные ресурсы Забайкальского края // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов. – 2015. – № 2. – С. 131–134.
23. Багашев И.А. Радиоактивность источников Забайкалья // Сборник в честь двадцатипятилетия научной деятельности Владимира Ивановича Вернадского. – М.: Типолитография товарищества И.Н. Кушнерев и Ко, 1914. – С. 29–41.
24. Оргильянов А.И., Крюкова И.Г., Бадминов П.С. Минеральные углекислые воды месторождения Ямкун (Восточное Забайкалье) // Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии: материалы Всероссийской конференции. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 446–450.
25. Замана Л.В. Геохимические особенности углекислых вод Восточного Забайкалья // Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии: материалы Всероссийской конференции. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 160–164.
26. Замана Л.В. Углекислые воды Даурской гидроминеральной области (Восточное Забайкалье) // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. – 2018. – Т. 95. – № 4. – С. 69–74.
27. Толстихин Н.И. Газы Восточного Забайкалья. – М.; Л.: Изд-во Академии СССР, 1932. – 40 с.
28. Погребняк Ю.Ф., Толочко В.В., Малясова З.В. Геохимия золота и урана в природных водах Забайкалья // Геохимия радиоактивных элементов и золота Забайкалья. – Новосибирск: Изд-во «Наука», 1979. – С. 120–124.
29. Vetrov V.A., Kuznetsova A.I., Sklyarova O.A. Baseline levels of chemical elements in the water of Lake Baikal // Geography and Natural Resources. – 2013. – V. 34. – P. 228–238.

Поступила 26.11.2018 г.

Информация об авторах

Соктоев Б.Р., кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рихванов Л.П., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

Замана Л.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии Института природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук.

Рудмин М.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Эпова Е.С., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории геохимии и рудогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук.

Солодухина М.А., кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории геохимии и рудогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук.

Этенко К.А., магистрант кафедры геологии полезных ископаемых геологического факультета Иркутского государственного университета.

Михайлова Л.А., кандидат медицинских наук, заведующий кафедрой гигиены Читинской государственной медицинской академии.

Холмогорова И.В., главный врач краевого центра медицинской реабилитации «Ямкун».

UDC 553.7.08:550.4:549(571.55)

MINERAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF YAMKUN SPRING (TRANSBAIKAL REGION)

Bulat R. Soktoev¹,
bulatsoktoev@tpu.ru

Leonid P. Rikhvanov¹,
rikhvanov@tpu.ru

Natalia V. Baranovskaya¹,
nata@tpu.ru

Leonid V. Zamana²,
l.v.zamana@mail.ru

Maxim A. Rudmin¹,
rudminma@tpu.ru

Ekaterina S. Epova²,
apikur1@ya.ru

Mariya A. Solodukhina²,
mabn@ya.ru

Konstantin A. Etenko³,
konstantin196@gmail.com

Larisa A. Mikhailova⁴,
mihailova-la@mail.ru

Irina V. Kholmogorova⁵,
kbvl_1@mail.ru

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

² Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
16a, Nedorezov street, Chita, 672002, Russia.

³ Irkutsk State University,
1, Karl Marx street, Irkutsk, 664003, Russia.

⁴ Chita State Medical Academy,
39a, Gorky street, Chita, 672000, Russia.

⁵ Regional Center of Medical Rehabilitation «Yamkun»,
1, Rabochaya street, Yamkun, 673632, Russia.

The relevance. Yamkun spring is known as one of the few radioactive springs in Transbaikalian region. Its waters were used for the treatment of Kaschin-Beck disease (Urov disease), nowadays the regional center of medical rehabilitation for the treatment of diseases of the musculoskeletal and nervous systems, including cerebral palsy, and diseases of the skin is working on the basis of this spring.

The main aim of the research is to identify mineralogical and geochemical characteristics of Yamkun spring components.

Objects: lake and stream water, travertines, ferruginous sediments in the stream bed, salt sediments on the tube of soak well, vegetation (lichens, mosses, pine straw, poplar leaves).

Methods: inductively coupled plasma mass-spectrometry, instrumental neutron activation analysis, X-ray diffractometry, scanning electron microscopy.

Results. Water of Yamkun spring is bicarbonate, calcium-magnesium, radioactive of radon nature. It is significantly enriched in Mn, Fe, Be, As, Zr, Cs, Hg, Tl, Li, Co and Ba relative to water of Lake Baikal. Water enrichment with rare alkaline and alkaline-earth elements (Li, Be, Cs), as well as Hg, Tl, As and Zr suggests that their source is rare-metal granitoids. During water discharge we observed modern mineral formation on the surface of water baths as «Yamkun foam» (aragonite), tubes of soak well (nesquehonite) and in the stream (ferruginous sediments). Ferruginous sediments and travertines are represented mainly with magnesian calcite. In the ferruginous sediments we identified in large quantities Fe and Mn compounds, probably hydroxides. The hydroxides of Mn also include Ba, K, Cl compounds, Fe hydroxides – As, P, Si, Al. Rare microinclusions in the travertines are represented with intermetallic phases of Cu and Sn, La-Ce carbonate and As sulphide (loellingite?). The inheritance of composition of modern ferruginous sediments and travertines is established. The forming travertines are enriched with the same elements as the water in the spring.

Key words:

Yamkun, mineral waters, travertines, ferruginous sediments, mineral composition, chemical composition

The research was carried out within the Program of TPU Competitiveness Enhancement among the leading world research centers.

REFERENCES

1. *Thermal and Mineral Waters: Origin, Properties and Applications*. Eds. W. Balderer, A. Porowski, H. Idris, J.W. LaMoreaux. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2014. 135 p.
2. *Mineral and Thermal Waters of Southeastern Europe*. Ed. by P. Papic. Cham, Springer International Publishing, 2016. 171 p.
3. Bouchaou L., Warner N.R., Tagma T., Hssaisoune M., Vengosh A. The origin of geothermal waters in Morocco: Multiple isotope tracers for delineating sources of water-rock interactions. *Applied Geochemistry*, 2017, vol. 84, pp. 244–253.
4. Chenaker H., Houha B., Vincent V. Hydrogeochemistry and geothermometry of thermal water from north-eastern Algeria. *Geothermics*, 2018, vol. 75, pp. 137–145.

5. Okan Ö.Ö., Kalender L., Çetindag B. Trace-element hydrogeochemistry of thermal waters of Karakoçan (Elazığ) and Mazgirt (Tunceli), Eastern Anatolia, Turkey. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, vol. 194, pp. 29–43.
6. Shvartsev S.L., Sun Z., Borzenko S.V., Gao B., Tokarenko O.G., Zippa E.V. Geochemistry of the thermal waters in Jiangxi Province, China. *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 96, pp. 113–130.
7. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Chudaev O.V., Kharitonova N.A., Vysotskiy S.V. Geochemistry of thermal waters of continental margin of Far East of Russia. *Acta Geologica Sinica – English Edition*, 2016, vol. 90, no. 1, pp. 276–284.
8. Censi P., Raso M., Yechieli Y., Ginat H., Salano F., Zuddas P., Brusca L., D'Alessandro W., Inguaggiato C. Geochemistry of Zr, Hf, and REE in a wide spectrum of Eh and water composition: The case of Dead Sea Fault system (Israel). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 844–857.
9. Lavrushin V.Yu., Kuleshov V.N., Kikvadze O.E. Travertines of the northern Caucasus. *Lithology and Mineral Resources*, 2006, vol. 41, no. 2, pp. 137–164.
10. Kele S., Özkul M., Förizs I., Gökgöz A., Baykara M.O., Alçiçek M.C., Németh T. Stable isotope geochemical study of Pamukkale travertines: New evidences of low-temperature non-equilibrium calcite-water fractionation. *Sedimentary Geology*, 2011, vol. 238, no. 1–2, pp. 191–212.
11. Özkul M., Kele S., Gökgöz A., Shen Ch.-Ch., Jones B., Baykara M.O., Förizs I., Németh T., Chang Yu-W., Alçiçek M.C. Comparison of the Quaternary travertine sites in the Denizli extensional basin based on their depositional and geochemical data. *Sedimentary Geology*, 2013, vol. 294, pp. 179–204.
12. Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Ilenok S.S., Baranovskaya N.V., Taisaev T.T. Mineralogical-geochemical features of travertines of the modern continental hydrotherms: A G-1 well, Tunka depression, Baikal rift zone. *Geology of Ore Deposits*, 2015, vol. 57, no. 4, pp. 331–347.
13. Cantonati M., Segadelli S., Ogata K., Tran H., Sanders D., Gerecke R., Rott E., Filippini M., Gargini A., Celico F. A global review on ambient Limestone-Precipitating Springs (LPS): Hydrogeological setting, ecology, and conservation. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 568, pp. 624–637.
14. Teboul P.-A., Durlot C., Gaucher E.C., Virgone A., Girard J.-P., Curie J., Lopez B., Camoin G.F. Origins of elements building travertine and tufa: New perspectives provided by isotopic and geochemical tracers. *Sedimentary Geology*, 2016, vol. 334, pp. 97–114.
15. Ibrahim K.M., Makhlof I.M., Naqah A.R.E., Al-Thawabteh S.M. Geochemistry and Stable Isotopes of Travertine from Jordan Valley and Dead Sea Areas. *Minerals*, 2017, vol. 7, no. 7, article number 82.
16. Jones B. Review of calcium carbonate polymorph precipitation in spring systems. *Sedimentary Geology*, 2017, vol. 353, pp. 64–75.
17. Jones B. Review of aragonite and calcite crystal morphogenesis in thermal spring systems. *Sedimentary Geology*, 2017, vol. 354, pp. 9–23.
18. Bagashev I.A. *Mineralnye istochniki Zabaykalya: Prilozheniya k Zapiskam Chitinskogo otdeleniya Priamurskogo otdela Rossiyskogo geograficheskogo obshchestva* [Mineral springs of Transbaikalia: Appendix to the Notes of the Chita office, Amur branch, Russian geographical society]. Moscow, M.D. Butin's Publ., 1905. 159 p.
19. *Mineralnye vody yuzhnoy chasti Vostochnoy Sibiri* [Mineral waters of the southern part of Eastern Siberia]. Moscow, Leningrad, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1961. Vol. 1, 345 p.
20. *Mineralnye vody yuzhnoy chasti Vostochnoy Sibiri* [Mineral waters of the southern part of Eastern Siberia]. Moscow, Leningrad, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1962. Vol. 2, 199 p.
21. *Malaya entsiklopediya Zabaykalya: Prirodnoe nasledie* [Small encyclopedia of Transbaikalia: Natural heritage]. Ed. by R.F. Geniatulin. Novosibirsk, Nauka Publ., 2009. 698 p.
22. Zamana L.V. *Gidromineralnye resursy Zabaykalskogo kraya* [Hydromineral resources of Zabaikalskiy krai]. *Kurortnaya baza i prirodnye lechebno-ozdorovitelnye mestnosti Tuvy i sopredelnykh regionov*, 2015, vol. 2, pp. 131–134.
23. Bagashev I.A. Radioaktivnost istochnikov Zabaykalya [The radioactivity of the springs of Transbaikalia]. *Sbornik v chest dvadtsatipyatiletiiy nauchnoy deyatel'nosti Vladimira Ivanovicha Vernadskogo* [Collection in honor of the twenty-fifth anniversary of scientific activity of Vladimir Vernadsky]. Moscow, I.N. Kushnerev and Co company typolithography, 1914. pp. 29–41.
24. Orgilyanov A.I., Kryukova A.I., Badminov P.S. Mineralnye uglekislые vody mestorozhdeniya Yamkun (Vostochnoe Zabaykale) [Mineral carbon dioxide waters of Yamkun deposit (Eastern Transbaikalia)]. *Sovremennye problemy gidrogeologii, inzhenernoy geologii i gidrogeoecologii Evrazii. Materialy Vserossiyskoy konferentsii* [Modern problems of hydrogeology, engineering geology and hydrogeoecology of Eurasia. Proc. of the All-Russian conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2015. pp. 446–450.
25. Zamana L.V. Geokhimicheskie osobennosti uglekislых vod Vostochnogo Zabaykalya [The geochemical characteristics of the carbon dioxide waters of the Eastern Transbaikalia]. *Sovremennye problemy gidrogeologii, inzhenernoy geologii i gidrogeoecologii Evrazii: materialy Vserossiyskoy konferentsii* [Modern problems of hydrogeology, engineering geology and hydrogeoecology of Eurasia. Proc. of the All-Russian conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2015. pp. 160–164.
26. Zamana L.V. Carbon dioxide waters of the Daurian hydromineral region (Eastern Transbaikalia). *Problems of Balneology, Physiotherapy, and Exercise Therapy*, 2018, vol. 95, no. 4, pp. 69–74. In Rus.
27. Tolstikhin N.I. *Gazy Vostochnogo Zabaykalya* [Gases of Eastern Transbaikalia]. Moscow, Leningrad, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1932. 40 p.
28. Pogrebnyak Yu.F., Tolochko V.V., Malyasova Z.V. Geokhimiya zolota i urana v priridnykh vodakh Zabaykalya [Geochemistry of gold and uranium in natural waters of Transbaikalia]. *Geokhimiya radioaktivnykh elementov i zolota Zabaykalya* [Geochemistry of radioactive elements and gold in Transbaikalia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979. pp. 120–124.
29. Vetrov V.A., Kuznetsova A.I., Sklyarova O.A. Baseline levels of chemical elements in the water of Lake Baikal. *Geography and Natural Resources*, 2013, vol. 34, pp. 228–238.

Received: 26 November 2018.

Information about the authors

Bulat R. Soktoev, Cand. Sc., assistant professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Leonid P. Rikhvanov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

Leonid V. Zamana, Cand. Sc., leading research scientist, Institute of Natural Resources, Environment, and Cryology.

Maxim A. Rudmin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ekaterina S. Epova, Cand. Sc., research scientist, Institute of Natural Resources, Environment, and Cryology.

Mariya A. Solodukhina, Cand. Sc., research scientist, Institute of Natural Resources, Environment, and Cryology.

Konstantin A. Etenko, master student, Irkutsk State University.

Larisa A. Mikhailova, Cand. Sc., head of the department, Chita State Medical Academy.

Irina V. Kholmogorova, chief doctor, Regional Center of Medical Rehabilitation «Yamkun».

УДК 621.825:621.318.12; 621.313.392

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ ГИСТЕРЕЗИСНОЙ МУФТЫ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ НЕФТЕПРОВОДА

Гарганеев Александр Георгиевич¹,
garganeev@rambler.ru

Динь Конг Кюи¹,
caothuhanam89@gmail.com

Сипайлова Надежда Юрьевна¹,
snu2002@mail.ru

Кашин Евгений Игоревич¹,
kashinei@sibmail.com

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

Актуальность работы связана с поиском новых эффективных технических решений в области электроприводов запорной арматуры трубопроводного транспорта нефтепродуктов на основе использования гистерезисного принципа электромеханического преобразования энергии и новых магнитотвердых материалов.

Цель: выявить оптимальную геометрию зубцовой зоны электромагнитной гистерезисной муфты на базе сплава Fe-Cr-Co для получения максимального вращающего момента на основе анализа процессов перемагничивания гистерезисного слоя.

Методы: экспериментальные методы исследования магнитных характеристик магнитотвердых материалов с использованием оригинальных лабораторных установок; имитационное моделирование в программе ANSYS MAXWELL; теоретические методы анализа электромагнитного поля.

Результаты. Для гистерезисных муфт на базе сплава Fe-Cr-Co 22X15KA получены и проанализированы зависимости вращающего момента от геометрических параметров зубцовой зоны муфты. Для оценки эффективности использования гистерезисного материала авторами введен коэффициент использования гистерезисного слоя по тангенциальной составляющей магнитного поля. В программе ANSYS MAXWELL разработана имитационная модель электромагнитной гистерезисной муфты с неподвижной обмоткой управления, учитывающая параметры сплава Fe-Cr-Co 22X15KA. С помощью разработанной модели получены оптимальные значения геометрических размеров зубцовой зоны с целью достижения максимального вращающего момента при фиксированных габаритах и весе. Сделан вывод о том, что вариант электропривода трубопроводной запорной арматуры с гистерезисной муфтой и асинхронным электродвигателем благодаря простоте его реализации, возможности регулирования и ограничения момента в широком диапазоне температур и окружных скоростей можно рассматривать как перспективную альтернативу электроприводам с частотным управлением и тиристорными регуляторами.

Ключевые слова:

Электромагнитная муфта, моделирование, электропривод, момент, гистерезис, магнитотвердый материал, запорная арматура, нефтепровод.

Введение

В многочисленных электроприводных системах электрический двигатель соединяется с производственным механизмом через муфту, служащую для передачи механической энергии с ведущего вала на ведомый при ограничении крутящего момента. Весьма распространенными системами являются электроприводы запорной арматуры (ЭПЗА) для перекачки нефти и газа, в которых требование ограничения крутящего момента является обязательным условием безопасного и надежного функционирования трубопроводного транспорта нефтепродуктов [1–3]. ЭПЗА выполняет функции перекрытия сечения трубопровода с фиксированным ограничением момента приводного двигателя (ПД) в условиях широкого температурного диапазона и удаления от диспетчерских пунктов и центральных электросетей.

Постановка задачи исследования

Вопросы применения типа ПД и управляющего полупроводникового преобразователя (ПП) подробно рассмотрено в работе [4], в которой впервые предложено в ЭПЗА применение электрической машины гистерезисного типа, являющейся, по сути, электромагнитной муфтой. Одним из вариантов построения ЭПЗА на основе гистерезисного принципа преобразования энергии является ЭП на базе широко применяемого асинхронного двигателя (АД) и гистерезисной муфты (ГМ) с простым блоком для регулирования постоянного тока управления [5]. В этом случае электромагнитная гистерезисная муфта (ЭМГМ) располагается между АД и редуктором, предотвращая увеличение момента уплотнения клина задвижки сверх максимально допустимых значений. Если требуется изменить моменты уплотнения (вытяжки) применяется про-

стейшая схема регулировки тока обмотки управления ЭМГМ на выходе или в составе выпрямителя В (рис. 1).

Гистерезисные муфты в режиме несинхронного вращения, торможения или пуска работают с постоянством момента, что может явиться решающим фактором для безотказной работы технологического механизма – запорной арматуры. При этом возможно устранение сложного блока электронного управления с частотными преобразователями или тиристорными регуляторами с ограничением вращающего момента на основе его идентификации, значительно снижающих надежность электропривода запорной арматуры [1, 6]. В отличие от подобных систем, приводящих, фактически, к торможению, остановке приводного двигателя и, как следствие, к его нагреву, вариант с ЭМГМ предусматривает лишь останов ведомого вала муфты. Для реализации идеи применения ГМ в составе ЭПЗА необходимо провести ряд исследований, связанных с особенностями перематывания гистерезисного материала в составе ГМ, что позволит выявить оптимальную геометрию зубцовой зоны муфты с целью получения максимального вращающего момента при ее фиксированных габаритах и весе.

Теория перематывания гистерезисного материала в конструкции муфты

Конструктивные варианты гистерезисных магнитных и электромагнитных муфт рассмотрены в [5, 7–9]. Для применения в ЭПЗА представляет интерес конструкция ЭМГМ (рис. 1) с неподвижной внешней обмоткой, позволяющая обеспечить работу во взрывоопасной зоне при организации бесконтактного управления муфтой в непосредственной близости с нефте- или газопроводом. Следует отметить, что приведенную на рис. 1, б немагнитную вставку (поз. 8) можно не использовать, изготовив внешний индуктор из одного ферромагнитного материала, поскольку сечение зубцовой зоны значительно превы-

шает сечение элемента поз. 8. Обмотка управления – 7 создает постоянный магнитный поток, регулировку которого при необходимости можно осуществлять изменением тока обмотки. В гистерезисном слое – 4 за счет наличия зубцов внутреннего и внешнего индукторов образуется переменная составляющая магнитного потока, приводящая к возникновению потерь на гистерезис и постоянной величины гистерезисного момента, не зависящего от скорости вращения ведущего вала ЭМГМ. Зубцы внешнего и внутреннего индукторов ЭМГМ могут иметь различную геометрическую форму.

Традиционными магнитными материалами для гистерезисных двигателей и муфт следует считать сплавы типа 52КФ на основе Fe-Co-V (викаллоу) с удельными потерями на гистерезис $p_r \approx 0,05$ Дж/см³, а также сплавы типа 12ГН на основе Fe-Ni-Mn и 12КВ на основе Fe-Co-W-Mo с $p_r \approx 0,02$ Дж/см³. Данные сплавы обладают низкими удельными потерями на гистерезис и высокой стоимостью. Современным и перспективным материалом для гистерезисных муфт и двигателей является деформируемый сплав типа Fe-Cr-Co, обладающий высокими механическими и стабильными магнитными свойствами в широком температурном диапазоне и с большими для гистерезисных материалов значениями удельных потерь на гистерезис ($p_r = 0,12 \dots 0,18$ Дж/см³) и энергетического произведения $(BH)_{\max} = 40 \dots 60$ кДж/м³ [10, 11]. Высокие прочностные свойства сплава Fe-Cr-Co способны конкурировать с высокопрочными сталями и титаном, что позволяет применять указанный сплав в безбандажных высокоскоростных механизмах. Согласно исследованиям работы [12], сплав типа 25X15К на основе Fe-Cr-Co при сохранении магнитных свойств имеет стабильные пластические и прочностные свойства до температуры 500 °С. В различных структурных состояниях сплавы Fe-Cr-Co имеют предел прочности $\sigma_b = 980 \dots 1000$ МПа, что превышает аналогичные показатели титана.

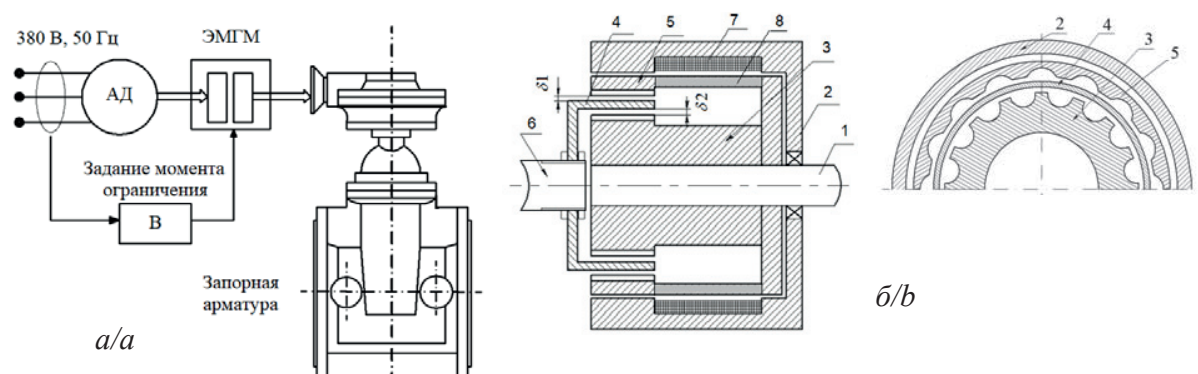


Рис. 1. Электропривод запорной арматуры с электромагнитной гистерезисной муфтой (а) и ее конструкция (б): 1 – ведущий вал; 2 – наружный индуктор; 3 – внутренний индуктор; 4 – гистерезисный слой; 5 – внешний индуктор; 6 – ведомый вал; 7 – неподвижная обмотка возбуждения; 8 – немагнитная вставка; $\delta 1$, $\delta 2$ – рабочие зазоры

Fig. 1. Valves electric drive with electromagnetic hysteresis clutch (a) and its design (b): 1 is the driving shaft; 2 is the external inductor; 3 is the internal inductor; 4 is the hysteresis layer; 5 is the outdoor inductor; 6 is the driven shaft; 7 is the field winding; 8 is the non-magnetic insert; $\delta 1$, $\delta 2$ are the working air gaps

Теория гистерезисных муфт изложена, в частности, в работах [7, 8, 13, 14], на основе чего появился ряд отечественных изобретений, например [15–17]. Среди зарубежных патентов можно выделить работы [18–20]. Следует отметить, что в теоретических исследованиях указанных выше авторов практически не рассмотрены вопросы перемагничивания гистерезисных материалов в зависимости от конструктивных особенностей муфт, в частности от геометрии зубцовой зоны. Упрощения, принятые вышеуказанными авторами, объясняются математическими трудностями, связанными с учетом нелинейности зависимости $B=F(H)$, а также непостоянством магнитной проницаемости и гистерезисного угла. Кроме того, известно, что гистерезисные потери зависят не только от индукции в материале, но и от типа перемагничивания (линейное – тангенциальное или радиальное, и вращательное).

На рис. 2 представлен фрагмент зубцовой зоны ЭМГМ из магнитомягкого материала и гистерезисного слоя. Из рисунка следует, что в зависимости от относительного сдвига зубцов внутреннего и наружного индуктора точка « m », представляющая собой элементарный объем гистерезисного материала, в асинхронном режиме испытывает различные воздействия от изменяющегося магнитного поля. На рис. 2, *а* элементарный объем « m » перемагничивается по полному циклу петли гистерезиса материала при тангенциальном поле по траектории $a-b-c-e-f-a$, а на рис. 2, *б*, *в* – по частному циклу петли при радиальном поле по траектории $a-b-c-d-a$, что в обоих случаях можно отнести к линейному перемагничиванию и пользоваться видом петли гистерезиса, получаемой при помощи «классических» установок по снятию петель [5, 9].

В общем случае, в зависимости от толщины гистерезисного слоя, величины воздушного зазора и геометрии зубцовой зоны, картина распределения магнитного потока может выглядеть сложнее, с элементами вращательного гистерезиса.

Решение задачи оптимизации зубцовой зоны ЭМГМ на основе моделирования в ANSYS MAXWELL

Получение различных аналитических зависимостей момента ЭМГМ практически невозможно, а задачу оптимизации можно решить с применением пакета ANSYS MAXWELL, успешно используемого при расчетах магнитных полей. В соответствии с трехмерной моделью ЭМГМ, сформированной в ANSYS MAXWELL (рис. 3, *а*), на рис. 3, *б* представлена картина распределения магнитного поля в поперечном разрезе зубцовой зоны муфты с неподвижной внешней обмоткой.

Результаты имитационного моделирования ЭМГМ показаны на рис. 4, 5. Как следует из рис. 3, *б*, представляющего картину распределения магнитного поля в плоском разрезе ГМ, вектор магнитной индукции в зубцовой зоне совершает колебания около радиального направления. Радиальная составляющая магнитного поля практически не изменяется, поскольку суммарная величина воздушных зазоров при движении точки « m » остается постоянной. Такое перемагничивание материала можно характеризовать как частичное вращательное, в результате чего точка « m », представляющая элементарный объем активного слоя, совершает движение по симметричному циклу петли гистерезиса под воздействием тангенциальной составляющей поля.

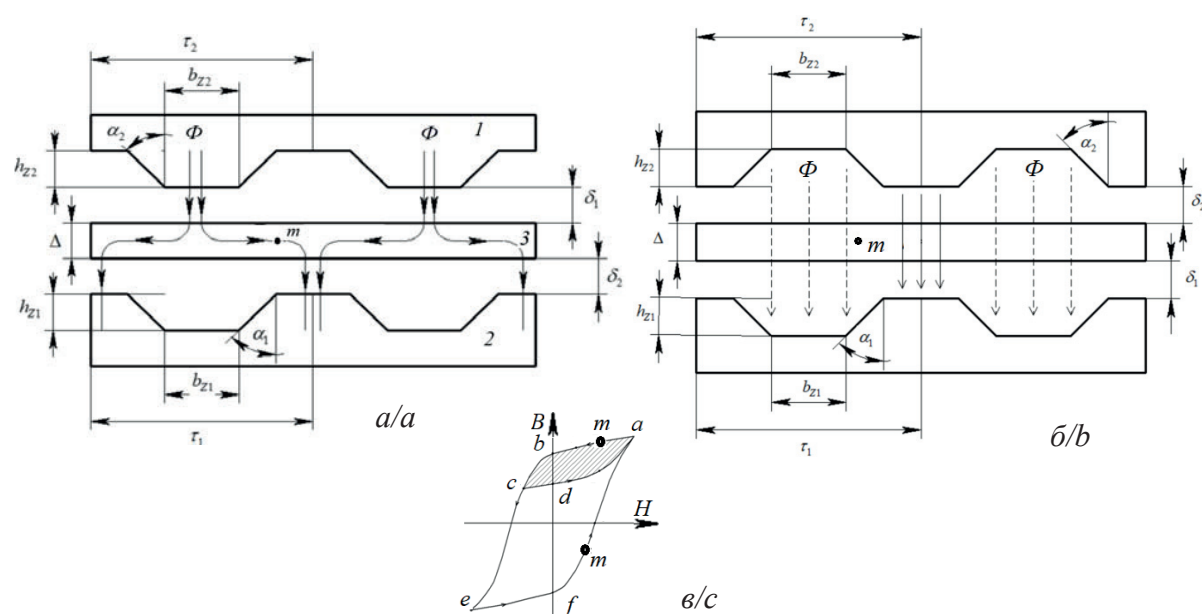


Рис. 2. Фрагмент зубцовой зоны электромагнитной гистерезисной муфты: 1, 2 – наружный и внутренний индуктор; 3 – гистерезисный слой; а – тангенциальное перемагничивание; б – радиальное перемагничивание; в – траектория точки « m »

Fig. 2. Piece of the electromagnetic hysteresis clutch teeth zone: 1, 2 are the external and internal inductors; 3 is the hysteresis layer: a is the tangential magnetization reversal; b is the radial magnetization reversal; c is the trajectory of the point « m »

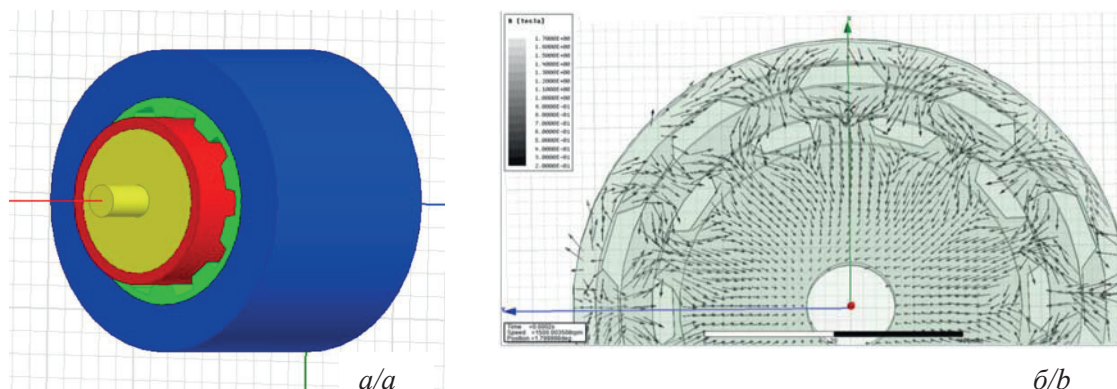


Рис. 3. Трехмерная модель электромагнитной гистерезисной муфты (а) и распределение магнитного поля в электромагнитной гистерезисной муфте (б)

Fig. 3. Electromagnetic hysteresis clutch three-dimensional model (a) and the magnetic field distribution in electromagnetic hysteresis clutch (b)

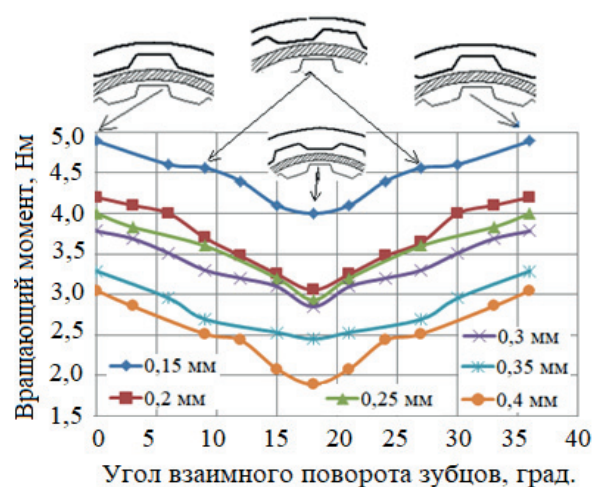


Рис. 4. Зависимость вращающего момента электромагнитной гистерезисной муфты от взаимного расположения зубцовых зон индукторов и величины воздушного зазора

Fig. 4. Dependence of the electromagnetic hysteresis clutch torque on the relative position of the inductors teeth zones and the air gap size

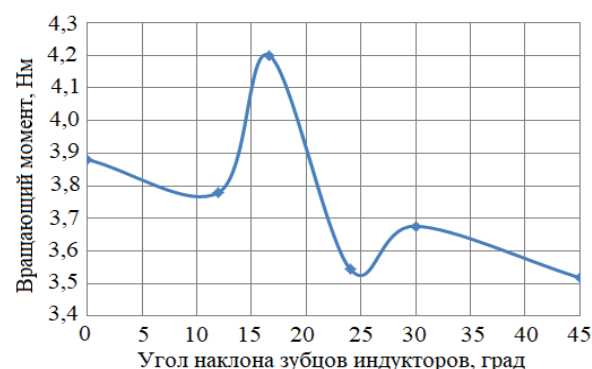


Рис. 5. Зависимость вращающего момента электромагнитной гистерезисной муфты от угла наклона зубцов индукторов

Fig. 5. Dependence of the electromagnetic hysteresis clutch torque on the inductors teeth inclination angle

Из рис. 4 следует, что наибольший момент в ЭМГМ развивается при уменьшении воздушного зазора δ и расположении зубцов согласно рис. 3, б, что объясняется возрастанием тангенциальной со-

ставляющей поля по мере сдвига зубцов внутреннего индуктора относительно наружного. Что касается конструкции зубцов, то, как следует из результатов моделирования, существует некоторое оптимальное значение угла α наклона зубцов индукторов, при котором развивается наибольший вращающий момент (рис. 5). Физическое обоснование этого факта состоит в следующем.

При постоянстве размеров воздушных зазоров δ , толщины гистерезисного слоя Δ , размерах h и r наклон зубцов сопровождается изменением ширины зубцов b и угла наклона α . При этом угол α изменяется от нуля до некоторого предельного значения $\alpha_{\text{пр}} = \arctg(r/2h)$ при получении зубцов треугольной формы и $b=0$. При нулевом угле α зубцы имеют форму прямоугольника. При уменьшении ширины зубцов и увеличении угла α начинается снижение величины общего магнитного потока Φ ввиду возрастания магнитного сопротивления эквивалентного воздушного зазора, что ведет к снижению момента ЭМГМ. Увеличение угла α и уменьшение ширины зубцов b приводит к возрастанию тангенциальной составляющей магнитного потока и резкому увеличению момента. При дальнейшем увеличении угла α на фоне снижения общего магнитного потока и его тангенциальной составляющей момент ЭМГМ снижается. Однако при уменьшении ширины зубцов происходит их локальное насыщение и, как следствие, некоторое увеличение тангенциальной составляющей индукции. Последующее увеличение угла до предельного значения $\alpha_{\text{пр}}$ вырождает зубцы в треугольные при снижении магнитного потока и момента муфты. Таким образом, в графике зависимости вращающего момента ЭМГМ от наклона зубцов внутреннего и внешнего индукторов наблюдаются два экстремума.

При варьировании параметров зубцов лишь внешнего индуктора и постоянных значениях наклона и ширины зубцов внутреннего индуктора зависимость момента от угла наклона аналогична рис. 5 (рис. 6) при некоторых количественных отличиях. В эксперименте также фиксировалось значение тангенциальной составляющей индук-

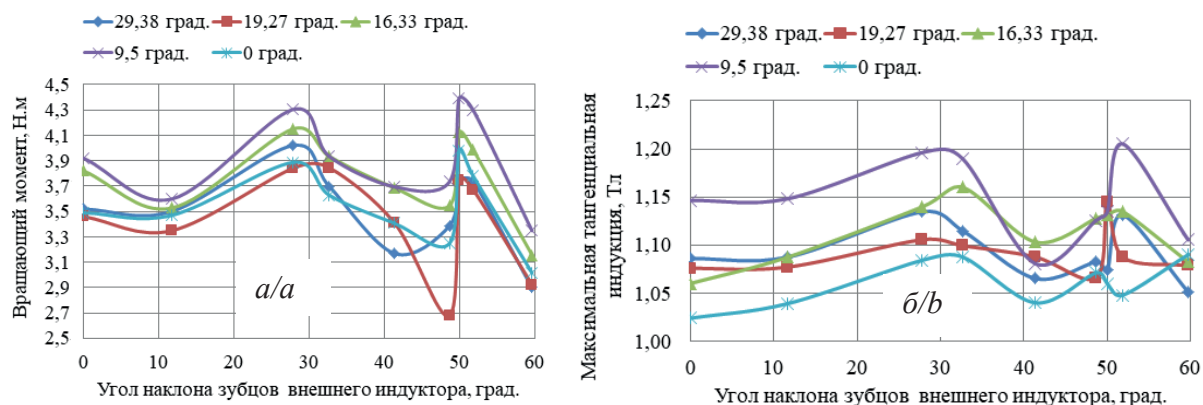


Рис. 6. Зависимости вращающего момента (а) и максимальной тангенциальной индукции (б) от угла наклона зубцов внешнего индуктора при разных углах наклона зубцов внутреннего индуктора при числе зубцов $z=10$

Fig. 6. Dependences of the torque (a) and maximum tangential magnetic flux density (b) on the external inductor teeth inclination angle at different inclination angles of the internal inductor teeth when the teeth number is $z=10$

ции в гистерезисном слое (рис. 6, б). Как следует из рис. 6, варьирование шириной зубцов индукторов приводит к аналогичным зависимостям.

Как было отмечено выше, электромагнитный момент и эффективность ЭМГМ определяются тан-

генциальной составляющей магнитного потока в гистерезисном слое. Для оценки указанной эффективности введем коэффициент использования гистерезисного слоя по тангенциальной составляющей магнитного поля

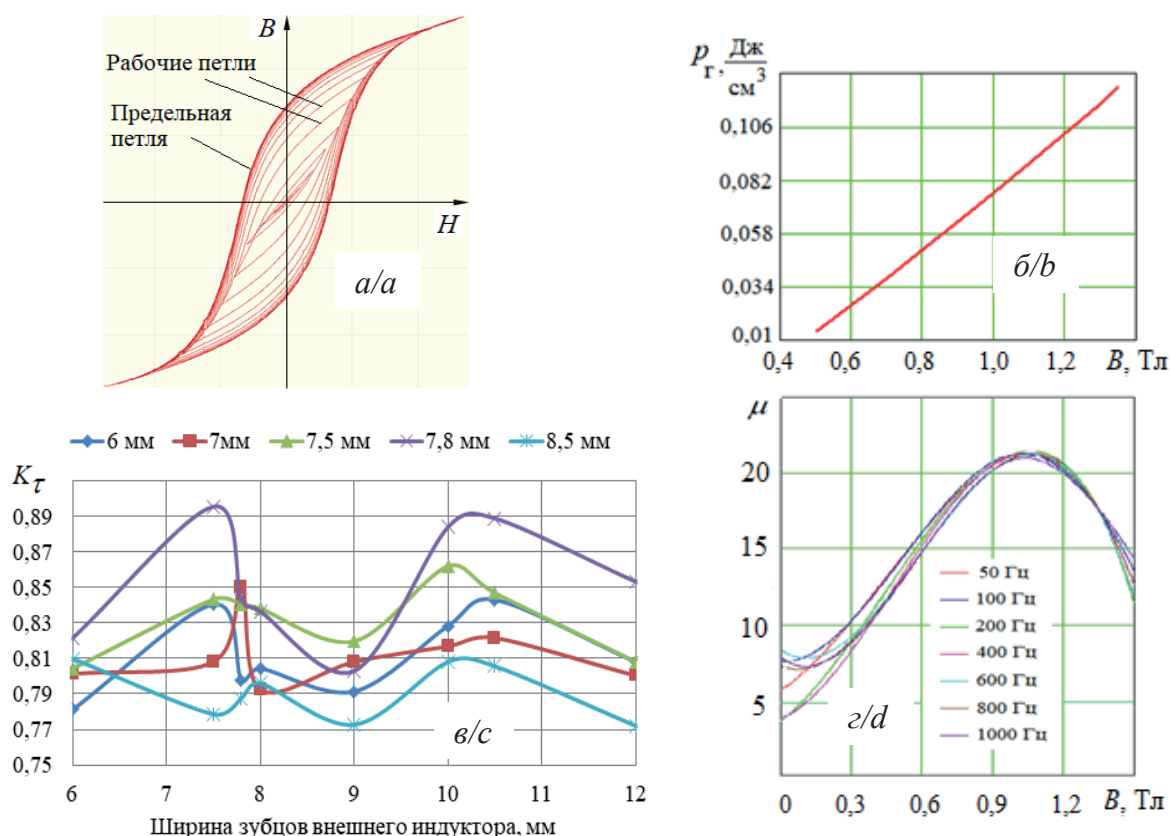


Рис. 7. Семейство петель гистерезиса (а), удельные гистерезисные потери (б), кривые коэффициента использования гистерезисного слоя по тангенциальной составляющей индукции в зависимости от ширины зубцов (в) и относительная магнитная проницаемость (г) в функции от индукции для материала 22Х15КА (кривая $\mu=F(B)$ дана при различных частотах перемагничивания гистерезисного слоя)

Fig. 7. Family hysteresis loops (a), the specific hysteresis losses (b), the curve of the hysteresis layer efficiency in relation to the magnetic flux density tangential component depending on the teeth width (c) and the relative magnetic permeability (d) as functions on the magnetic flux density for 22X15KA material (the curve $\mu=F(B)$ is given at different hysteresis layer magnetization frequencies)

$$K_r = \frac{p_{\text{раб}}}{p_{\text{max}}} = \frac{\oint H_{\text{раб}} dB}{\oint H_{\text{max}} dB}, \quad (1)$$

где p_{max} , $p_{\text{раб}}$ и H_{max} , $H_{\text{раб}}$ – удельные потери на гистерезис и напряженность поля при максимальной и рабочей индукции соответственно.

Тогда выражение для момента ЭМГМ при объеме гистерезисного слоя V_r примет вид:

$$M_r = p_r V_r K_r. \quad (2)$$

На рис. 7, а представлено семейство петель гистерезиса материала Fe-Cr-Co (сплав 22Х15КА), полученное авторами на установке контроля магнитных параметров УКМП-0,05–100, на основе чего были построены зависимости удельных гистерезисных потерь p_r от индукции (рис. 7, б), а также магнитной проницаемости гистерезисного материала от индукции и частоты перемagnetивания (рис. 7, г). Фактически круговые интегралы в выражении (1) представляют из себя площади петель гистерезиса в соответствии с рис. 7, а. При этом тангенциальная составляющая индукции B_r может быть представлена как

$$B_r = \mu_0 \mu H_r, \quad (3)$$

где μ_0 и μ – соответственно магнитная проницаемость вакуума и относительная магнитная проницаемость гистерезисного материала.

На рис. 7, в представлены зависимости коэффициента использования гистерезисного слоя по тангенциальной составляющей от ширины зубцов, коррелирующие с рис. 6.

В технологическом плане круглые пазы могут быть предпочтительнее трапециевидных, поэтому были проанализированы характеристики гистерезисных муфт с такими пазами. Как показали исследования, при постоянном объеме муфты круглые пазы дают худшие результаты по передаче вращающего момента по сравнению с пазами трапециевидной формы (рис. 8), что объясняется большей зависимостью магнитного потока от ширины зубца в его наиболее узком сечении S , а также от потоков рассеяния $\Phi_{\text{рас}}$ при изменении положения центра окружности паза или его высоты (рис. 8, г–е). Зависимости, приведенные на рис. 9, также подтверждают меньшую эффективность пазов круглого сечения. Следует обратить внимание, что при увеличении количества зубцов коэффициент использования гистерезисного слоя падает (рис. 10), однако при этом момент ЭМГМ растет. Это объясняется тем, что с увеличением количества зубцов снижается тангенциальная составляющая индукции, поскольку зубцы располагаются ближе друг к другу, однако их количество компенсирует уменьшение момента за счет снижения тангенциальной составляющей.

Обсуждение полученных результатов

Проведенные исследования позволяют более глубоко и наглядно представить процессы перемagnetивания гистерезисного слоя в составе ЭМГМ, что, в свою очередь, приводит к возможности оптимизации электромагнитной системы муфты с целью получения максимального вращающе-

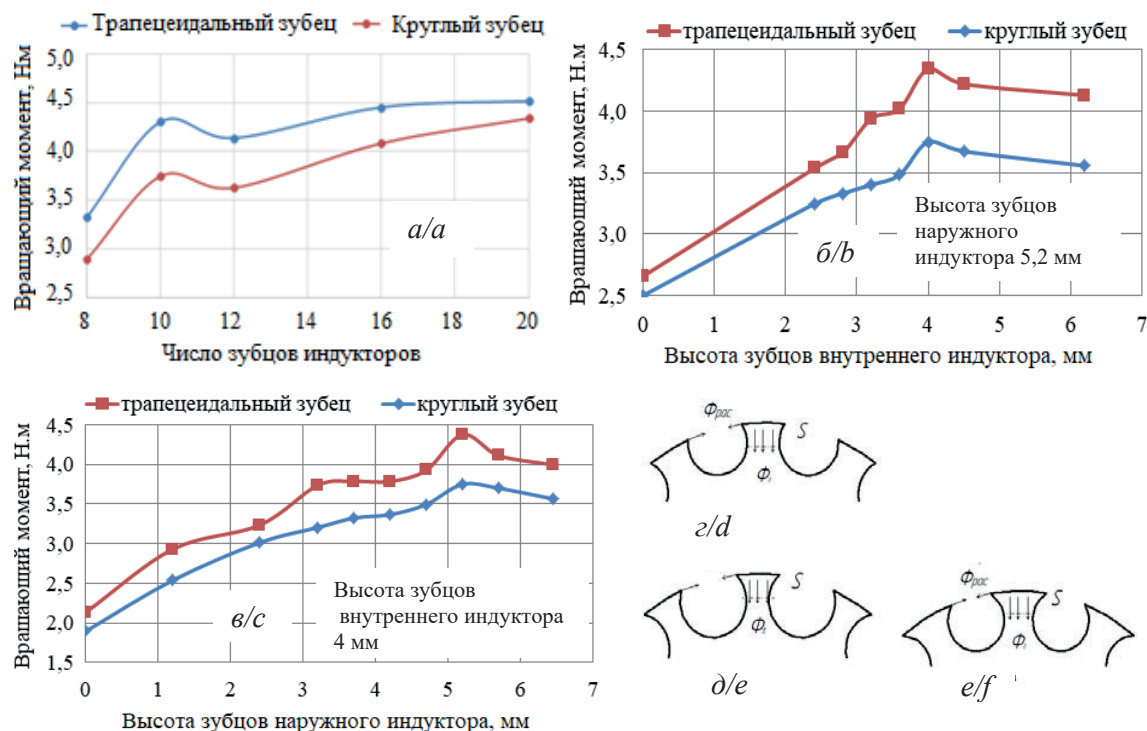


Рис. 8. Зависимость вращающего момента электромагнитной гистерезисной муфты от числа зубцов индукторов при различных формах пазов (а), размерах зубцов индукторов (б, в) и фрагмент зубцовой зоны с круглыми пазами (г–е)

Fig. 8. Dependence of the electromagnetic hysteresis clutch torque on the teeth inductors number for various slots forms (a), inductors teeth dimensions (b, c), and a piece of the teeth zone with round slots (d–f).

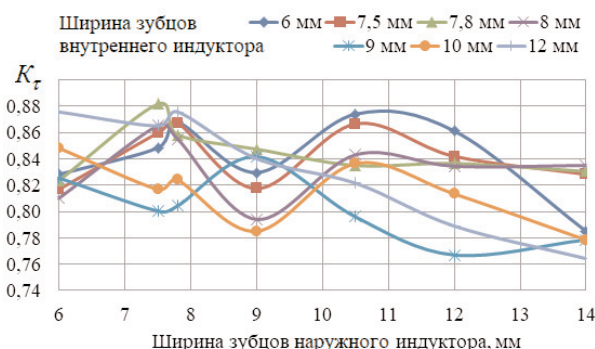
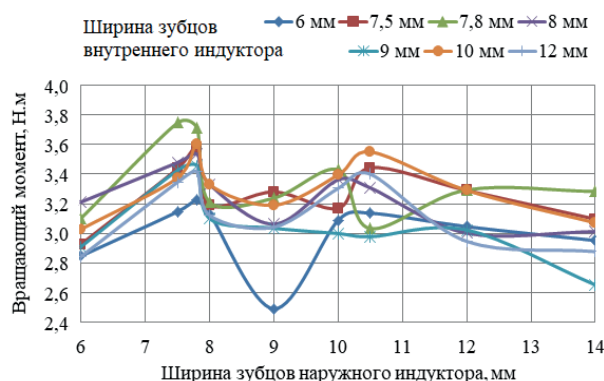


Рис. 9. Зависимость момента и коэффициента использования гистерезисного слоя от ширины зубцов наружного индуктора при разных ширинах зубцов внутреннего индуктора для круглых зубцов при $z=10$

Fig. 9. Dependence of the torque and the hysteresis layer efficiency on the external inductor teeth width at different widths of the internal inductor teeth for round teeth when the teeth number is $z=10$



Рис. 10. Зависимость коэффициента использования гистерезисного слоя по тангенциальной составляющей от числа зубцов индукторов

Fig. 10. Dependence of the hysteresis layer efficiency in relation to the magnetic flux density tangential component depending on the teeth inductors number

го момента при фиксированных габаритах и массе. Результаты исследования, представленные в настоящей статье, а также в работе [21], показывают, что свойства сплава типа 22Х15КА на основе Fe-Cr-Co в части магнитной проницаемости слабо зависят от частот перемагничивания вплоть до частоты 2000 Гц, что при его высокой прочности по-

зволяет конструировать ЭМГМ на высокие окружные скорости. Зубцовая зона ЭМГМ с зубцами трапецидальной формы дает лучшее использование геометрических размеров муфты для достижения максимального момента по сравнению с зубцами круглой формы. Оптимальным значением углов наклона зубцов следует считать значения $\alpha=9,5^\circ$ для внутреннего индуктора и $\alpha=27,8^\circ$; $\alpha=57,8^\circ$ для наружного индуктора при относительном сдвиге зубцов индукторов наполовину зубцового шага.

Заключение

Результаты моделирования подтверждают и дополняют расчетные данные, полученные ранее авторами, в частности, в работах [5, 9]. Таким образом, вариант ЭПЗА с ЭМГМ и АД благодаря простоте его реализации, возможности регулирования и ограничения момента в широком диапазоне температур и окружных скоростей можно рассматривать как перспективную альтернативу ЭП с частотным управлением и тиристорными регуляторами. Следует отметить, что, в принципе, положительные особенности гистерезисных муфт удачно сочетаются со спецификой работы технологических механизмов различных устройств, что и объясняет интерес разработчиков к такого рода электромеханическим преобразователям [22–30].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарганеев А.Г., Каракулов А.С., Ланграф С.В. Электропривод запорной арматуры. – Томск: Томский политехнический университет, 2013. – 157 с.
2. Гуревич Д.Ф. Трубопроводная арматура: справочное пособие. 2-е изд., переработанное и дополненное. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1981. – 368 с.
3. Васин С.А., Плахотникова Е.В. Методика расчета величины крутящего момента настройки электропривода в системе электроприводной запорной арматуры с прямолинейным перемещением запорного органа // Записки Горного института. – 2018. – Т. 232. – С. 407–412.
4. Гарганеев А.Г., Каракулов А.С., Ланграф С.В. Электропривод запорной арматуры как мехатронная система // Научный вест-

ник Новосибирского государственного технического университета. – 2013. – № 2. – С. 180–187.

5. Гарганеев А.Г., Кюи Д.К., Кашин Е.И. Электропривод задвижки трубопроводной арматуры с гистерезисной муфтой // Доклады Томского университета систем управления и радиоэлектроники. – 2018. – Т. 21. – № 1. – С. 127–131.
6. Ануфриев В.П., Чвялев Д.С., Волин А.О. Запорная и регулирующая арматура. Многократное увеличение срока службы // Арматуростроение. – 2018. – № 5 (116). – С. 49–51.
7. Мизюрин С.Р., Ермилов М.А. Проектирование магнитно-гистерезисных муфт. – М.: Ротапринт, Московский авиационный институт, 1966. – 123 с.
8. Ганзбург Л.Б., Федотов А.И. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: справочник. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1980. – 364 с.

9. Гистерезисные муфты на основе материала Fe-Cr-Co / А.Г. Гарганеев, Д.К. Кюи, Е.И. Кашин, Н.Ю. Сипайлова // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 4 (138). – С. 33–38.
10. Практика и дальнейшие перспективы промышленного использования высокопрочных наноструктурных магнитотвердых сплавов системы Fe-Cr-Co // Г.С. Бурханов, А.Г. Дормидонтов, И.М. Мильяев, В.С. Юсупов // Нанотехнологическое общество России. URL: <http://www.ntsrf.info/science/library/3201.htm> (дата обращения: 15.05.2019).
11. Магнитные гистерезисные и механические свойства магнитотвёрдого сплава 27X15K2MCTФ / И.М. Мильяев, В.С. Юсупов, С.Ю. Останин, С.И. Стельмашок, А.И. Мильяев, Н.В. Лайшева // Физика и химия обработки материалов. – 2017. – № 1. – С. 69–76.
12. Вомпе Т.А. Разработка и исследование низкокобальтовых магнитотвердых Fe-Cr-Co-сплавов: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2018. – 155 с.
13. Мастяев Н.З., Орлов И.Н. Гистерезисные электродвигатели. Ч. I. – М.: Московский энергетический институт, 1963. – 220 с.
14. Тарасов В.Н., Делекторский Б.А. Управляемый гистерезисный привод. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.
15. Управляемая гистерезисная муфта: Авторское свидетельство СССР № 604098, H02K 49/04. – Бюл. № 15 от 25.04.78. – 3 с.
16. Управляемая гистерезисная муфта: Авторское свидетельство СССР № 332552, H02K 49/04. – Бюл. № 10 от 19.04.72. – 2 с.
17. Электромагнитная гистерезисная муфта: Авторское свидетельство СССР № 442556, H02K 49/04. – Бюл. № 33 от 05.09.74. – 2 с.
18. Hysteresis Clutch for Film Winding: patent № US3934833, Jan. 27, 1976.
19. Hysteresis clutch: patent № US2912607A, July 07, 1956.
20. Magnetic hysteresis clutch: patent № US5581139A, August 25, 1993.
21. Гарганеев А.Г., Кашин Е.И., Кашеутов А.В. О фильтрующих свойствах электромагнитной системы гистерезисных гидродвигателей в мехатронных устройствах с использованием информативных свойств автономного инвертора // Электричество. – 2019. – № 1. – С. 55–66.
22. Zhou Wu. Comprehensive Calculating Method of Friction Moment for Circle Disc Frictional Clutch // Journal of Shaanxi Institute of Technology. – 2004. – V. 20. – № 4. – P. 4–11.
23. Kielan P., Kowol P., Pilch Z. Conception of the electronic controlled magneto-rheological clutch // Electrical Review. – 2011. – V. 87. – № 3. – P. 93–95.
24. Yuliang S., Shaopu Y., Cunzhi P. Experimental research of magneto-rheological fluid clutch // IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. – 2005. – P. 104–107.
25. Magnetic Properties of Hard Magnetic Alloy of Fe-27Cr-10Co-2Mo / M.I. Alymov, I.M. Milyaev, V.S. Yusupov, V.A. Zelensky, A.I. Milyaev, A.B. Ankudinov, D.M. Abashev // Proc. of the 14th Sino-Russia Symposium on Advanced Materials and Technologies by the Nonferrous Metals Society of China. – 2018. – P. 64–68. DOI: 10.1088/1757-899X/347/1/012053.
26. Shock-resistance rotor design of a high-speed PMSM for integrated pulsed power system Wan Yuan, Cui Shumei, Wu Shaopeng, Song Liwei, I.M. Milyaev, S.Yu. Ostanin // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2017. – V. 45. – № 7. – P. 1399–1405.
27. Analysis of a modular pulsed alternate power system for driving 32-MJ muzzle energy railgun / Cui Shumei, Wang Shaofei, Wu Shaopeng, S.Yu. Ostanin, I.M. Milyaev // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2017. – V. 45. – № 7. – P. 1128–1133.
28. Proposal of electromagnetic clutch structure to suppress surge voltage / J. Muramatsu, T. Kojima, H. Tanaka, Y. Hattori, H. Okada, H. Keino, T. Nakanishi, K. Fujisaki // IEEE Transactions on Magnetics. – 2014. – V. 50. – № 11. – P. 1–4.
29. Wenjun Li. Design and Development of Magneto-Rheological Actuators with Application in Mobile Robotics: Thesis and Dissertation Repository. – Western Ontario, 2014. – 95 p.
30. Shafer A.S., Kermani M.R. On the feasibility and suitability of mr fluid clutches in human-friendly manipulators // Mechatronics, IEEE/ASME Transactions. – 2011. – № 99. – P. 1–10.

Поступила 31.05.2019 г.

Информация об авторах

Гарганеев А.Г., профессор, доктор технических наук, профессор Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Динь К.К., аспирант инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Сипайлова Н.Ю., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кашин Е.И., аспирант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.825:621.318.12; 621.313.392

OPTIMIZATION OF HYSTERESIS CLUTCH TEETH ZONE GEOMETRY IN OIL PIPELINE SHUT-OFF VALVES

Aleksandr G. Garganeev¹,

garganeev@rambler.ru

Din K. Kyui¹,

caothuhanam89@gmail.com

Nadezhda Yu. Sipaylova¹,

snu2002@mail.ru

Evgeniy I. Kashin¹,

kashinei@sibmail.com

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

The relevance of the paper is related to the search for new efficient technical solutions in the sphere of electric drives for oil pipeline valves based on using the hysteresis principle of electromechanical energy conversion and new hard magnetic materials.

The main aim of the research is to reveal with the analysis of the hysteresis layer magnetization the teeth zone optimal geometry of the electromagnetic hysteresis clutch based on the Fe-Cr-Co alloy to obtain the maximum torque.

The methods: experimental methods for studying the magnetic characteristics of magnetically hard materials using the original laboratory installations; simulation in the ANSYS MAXWELL, the theoretical methods of electromagnetic field analysis.

The results. The authors have obtained and investigated torque dependences on the teeth zone geometric parameters for the clutches based on Fe-Cr-Co 22X15KA alloy. To value the hysteresis material efficiency, the authors introduced the hysteresis layer use coefficient according to the magnetic field tangential component. The model of the electromagnetic hysteresis clutch with fixed control winding, taking into account the parameters of the alloy of Fe-Cr-Co 22X15KA was developed in the ANSYS MAXWELL program. To obtain the maximum torque at the limited clutch sizes and mass the optimal teeth zone geometric dimensions were determined. It is concluded, that the pipeline shut-off valves electric drive with hysteresis clutch and induction motor due to the ease of implementation, the possibility of regulating and limiting the torque in the wide temperatures and rotation speeds range, can be considered as a promising alternative to electric drives with frequency control and thyristor regulators.

Key words:

Electromagnetic clutch, simulation, electrical drive, torque, hysteresis, hard magnetic material, valves, oil pipeline.

REFERENCES

- Garganev A.G., Karakulov A.S., Langraf S.V. *Elektroprivod zapornoy armatury* [The shutoff valves of electric drive]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2013. 157 p.
- Gurevich D.F. *Truboprovodnaya armatura: spravochnoe posobie* [The pipelines shutoff valves: handbook]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 368 p.
- Vasin S.A., Plakhotnikova S.A. The calculation method of the electric drive torque setting in the electrically-driven shutoff valves with linear movement of the locking element. *Zapiski Gornogo instituta*, 2018, no. 232, pp. 407–412. In Rus.
- Garganev A.G., Karakulov A.S., Langraf S.V. The shutoff valves electric drive as mechatronic system. *Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2013, no. 2, pp. 180–187. In Rus.
- Garganev A.G., Kyui D. K., Kashin E. I. The electric drive with hysteresis clutch for pipeline valves. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 127–131. In Rus.
- Anufriev V.P., Chvyalev D.S., Volin A.O. The shutoff and control valves. Repeated increase of the service life. *Armaturestroenie*, 2018, no. 5 (116), pp. 49–51. In Rus.
- Mizyurin S.R., Ermilov M.A. *Proektirovanie magnitno-gistereiznoy mufty* [The magnetic hysteresis clutch development]. Moscow, Moscow Aviation Institute Publ., 1966. 123 p.
- Ganzburg L.B., Fedotov A.I. *Proektirovanie elektromagnitnykh i magnitnykh mekhanizmov: spravochnik*. [The electromagnetic and magnetic mechanisms development: Handbook]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1980. 364 p.
- Garganev A.G., Kyui D.K., Kashin E.I., Sipaylova N.Yu. Hysteresis clutches based on the Fe-Cr-Co material. *Mining equipment and electromechanics*, 2018, no. 4 (138), pp. 33–38. In Rus.
- Burhanov G.S., Dormidontov A.G., Milyaev I.M., Yusupov V.S. *Praktika i dalneyshie perspektivy promyshlennogo ispolzovaniya vysokoprochnykh nanostrukturnykh magnitotverdykh splavov sistemy Fe-Cr-Co* [Practice and future prospects industrial use of high-strength nanostructured hard magnetic alloys of Fe-Cr-Co]. *Nanotekhnologicheskoe obshchestvo Rossii*. Available at: <http://www.ntsr.info/science/library/3201.htm> (accessed 15 May 2019).
- Milyaev I.M., Yusupov V.S., Ostanin S.Yu., Stelmashok S.I., Milyaev A.I., Laysheva N.V. Magnetic hysteresis and mechanical properties of hard magnetic alloy of 27Kh15K2MSTF. *Physics and chemistry of materials treatment*, 2017, no. 1, pp. 69–76. In Rus.
- Vompe T.A. *Razrabotka i issledovanie nizkokobaltovykh magnitotverdykh Fe-Cr-Co splavov*. Dis. Kand. nauk [Development and research of low cobalt hard magnetic alloy of Fe-Cr-Co. Cand. Diss.]. Moscow, 2018. 155 p.
- Mastyayev N.Z., Orlov I.N. *Gistereiznye elektrodvigateli* [Hysteresis electrical motors]. Moscow, Moscow Power Engineering Institute Publ., 1963. 220 p.
- Delektorskiy B.A., Tarasov V.N. *Upravlyaemy gistereiznyy privod* [Hysteresis controlled drive]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 128 p.
- Yakovlev V.Ya. *Upravlyayemaya gistereiznaya mufta* [Hysteresis controlled clutch]. Patent no. 604098, 1978.
- Gordeev N.V. *Upravlyayemaya gistereiznaya mufta* [Hysteresis controlled clutch]. Patent no. 332552, 1972.

17. Kovalev N.P., Kharlamov N.V., Korsmik A.A. *Elektromagnitnaya gisterizisnaya mufta* [Electromagnetic hysteresis clutch]. Patent no. 442556, 1974.
18. Nash J.L., Falls G., Carrico Ph.H. Hysteresis Clutch for Film Winding. Patent no. US3934833, 1976.
19. Duncan J.E. Hysteresis clutch. Patent no. US2912607A, 1956.
20. Toukola R. Magnetic hysteresis clutch. Patent no. US5581139A, 1993.
21. Garganeev A.G., Kashin E.I., Kasheutov A.V. The filtering properties of the electromagnetic system of hysteresis hydraulic motors in mechatronic devices using the informative properties of the autonomous inverter. *Elektrichestvo*, 2019, no. 1, pp. 55–66. In Rus.
22. Zhou Wu. Comprehensive Calculating Method of Friction Moment for Circle Disc Frictional Cultch. *Journal of Shaanxi Institute of Technology*, 2004, vol. 20, no. 4, pp. 4–11.
23. Kielan P., Kowol P., Pilch Z. Conception of the electronic controlled magneto-rheological clutch. *Electrical Review*, 2011, vol. 87, no. 3, pp. 93–95.
24. Yuliang S., Shaopu Y., Cunzhi P. Experimental research of magneto-rheological fluid clutch. *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, 2005, pp. 104–107.
25. Alymov M.I., Milyaev I.M., Yusupov V.S., Zelensky V.A., Milyaev A.I., Ankudinov A.B., Abashev D.M. Magnetic Properties of Hard Magnetic Alloy of Fe-27Cr-10Co-2Mo. *Proc. of the 14th Sino-Russia Symposium on Advanced Materials and Technologies by the Nonferrous Metals Society of China*, 2018, pp. 64–68. DOI: 10.1088/1757-899X/347/1/012053.
26. Wan Yuan, Cui Shumei, Wu Shaopeng, Song Liwei, Milyaev I.M., Ostanin S.Yu. Shock-resistance rotor design of a high-speed PMSM for integrated pulsed power system. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, vol. 45, no. 7, pp.1399–1405.
27. Cui Shumei, Wang Shaofei, Wu Shaopeng, Ostanin S.Yu., Milyaev I.M. Analysis of a modular pulsed alternate power system for driving 32-MJ muzzle energy railgun. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, vol. 45, no. 7, pp. 1128–1133.
28. Muramatsu J., Kojima T., Tanaka H., Hattori Y., Okada H., Keino H., Nakanishi T., Fujisaki K. Proposal of electromagnetic clutch structure to suppress surge voltage. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, vol. 50, no. 11, pp. 1–4.
29. Wenjun Li. *Design and Development of Magneto-Rheological Actuators with Application in Mobile Robotics*: Thesis and Dissertation Repository. Western Ontario, 2014. 95 p.
30. Shafer A.S., Kermani M.R. On the feasibility and suitability of MR fluid clutches in human-friendly manipulators. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 2011, no. 99, pp. 1–10.

Received: 31 May 2019.

Information about the authors

Aleksandr G. Garganeev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Din K. Kyui, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nadezhda Yu. Sipaylova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Evgeniy I. Kashin, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.3/.4.06:551.25:553.2:167–047.58

ПРОБЛЕМЫ РУДНОЙ ГЕОЛОГИИ И ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР. ЧАСТЬ 4. МЕТАМОРФИЗМ И МЕЗОТЕРМАЛЬНОЕ РУДООБРАЗОВАНИЕ

Кучеренко Игорь Васильевич,

kivr@tpu.ru

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

Актуальность. Условия образования известных многочисленных мезотермальных месторождений золота в толщах черных сланцев разного возраста составляют предмет оживленной дискуссии, которая нередко приобретает черты суррогатной и, вероятно, в силу этого бесконечной вследствие исключения конкретным автором или авторским коллективом из учета, анализа, обобщения, обсуждения фактов, важных для решения проблемы, но не вписывающихся в доказательную базу данных разрабатываемых им/ими представлений.

Цель: для получения корректных результатов, необходимых для углубления теории гидротермального рудообразования и разработки, совершенствования комплексов эффективных прогнозно-поисковых критериев оруденения, устранять это негативное проявление человеческого фактора и в процедуре реконструкции процессов рудообразования вернуть дискуссию в нормальное русло посредством включения в научный оборот «удобных» и «неудобных» фактов.

Методы. Выполнен анализ баз данных, предложенных давно и недавно в обоснование метаморфогенно-гидротермальной и других гипотез образования мезотермальных месторождений золота в толщах черных сланцев. Обсуждаются приведенные авторские материалы, в том числе аналитические данные – результаты полного химического силикатного анализа (мокрого) горных пород, атомно-абсорбционного анализа содержания золота, серебра, ртути в горных породах, петрохимических балансовых расчетов межзональной миграции петрогенных элементов в околорудных метасоматических ореолах, математической обработки содержаний в горных породах рудогенных элементов.

Результаты. Сделан вывод о геолого-генетической однородности мезотермальных месторождений золота, образованных в кристаллическом и черносланцевом субстрате. Доказательством этому служат следующие ключевые факты: 1) контроль месторождений глубинными разломами; 2) близкий геологический возраст ранних плутонов, массивов палингенных гранитоидов с многочисленными сопровождающими дайками средне-кислых пород и поздними дайками умеренно-щелочных долеритов, долеритов, лейкодолеритов дорудных, внутрирудных, послерудных генераций, в том числе преобразованными в высокотемпературные биотит-роговообманковые метасоматиты внутрирудными дайками-флюидопроводниками, и руд; 3) аутентичная минералого-петрохимическая зональность околорудных метасоматических ореолов в том и другом субстрате, образованных в условиях калиево-сернисто-углекислотного метасоматизма пропилит-березитового профиля с поступлением в ореолы калия, восстановленной серы, углекислоты, удалением натрия и частично кремния; 4) наследование околорудными метасоматитами петрохимического профиля внутридолеритового метасоматизма и контрастных аномалий фемофильных элементов (P, Mg, Fe, Ti); 5) отвечающие метеоритному стандарту (мантии) изотопные отношения серы сульфидов и углерода карбонатов руд и околорудных метасоматитов. Перечисленные факты исключают участие метаморфизма в рудообразовании. В Ленском районе, как и в других золоторудных районах горно-складчатого обрамления Сибирского кратона, мезотермальные месторождения золота образованы в составе антидромных гранит-диорит-долеритовых флюидно-рудно-магматических комплексов на позднем базитовом этапе их функционирования, а внутрирудные дайки-флюидопроводники преобразованных в высокотемпературные биотит-роговообманковые метасоматиты умеренно щелочных долеритов служат связующим звеном между базитовыми очагами мантии – источниками золотоносных растворов – и месторождениями золота в коре.

Структура статьи. В части 3 статьи приведены разделы: содержание проблем и постановка задачи; минералого-петрохимическая зональность околорудных метасоматических ореолов пропилит-березитового профиля в мезотермальных месторождениях золота, образованных в кристаллическом субстрате и толщах черных сланцев; минералого-петрохимическая зональность околорудного метасоматического ореола золоторудного месторождения Сухой Лог. В части 4 статьи приведены разделы: распределение рудогенных элементов в околорудном пространстве мезотермальных месторождений золота, образованных в кристаллическом субстрате и толщах черных сланцев; обсуждение результатов и выводы; заключение.

Ключевые слова:

Мезотермальные месторождения золота, кристаллический субстрат, черные сланцы, магматизм, метаморфизм, рудообразование, человеческий фактор.

Распределение рудогенных элементов в околорудном пространстве мезотермальных месторождений золота, образованных в кристаллическом субстрате и толщах черных сланцев

Распределение рудогенных (золота, серебра, ртути), как и петрогенных, включая фемофильные, элементов в рудовмещающих горных породах разного состава, возраста и происхождения в мезотермальных месторождениях золота подчиняется околорудной метасоматической (минералого-петрохимической) зональности (табл. 1–4, рис. 1, 2).

Это выражается в субкларковых содержаниях металлов во фронтальной зоне околорудных метасоматических ореолов или в повышенных против кларка, но минимальных во вскрытых объемах ореолов содержаниях их, – при недоступности для изучения фронтальной зоны в промежуточных хлоритовой, углеродистой минералого-петрохимических зонах и в повышении содержаний металлов в направлении к тыловым (альбитовой, березитовой) зонам с достижением, как правило, в последней максимальных значений. Также последова-

тельно возрастают, за редкими исключениями, другие параметры распределения металлов – стандартный множитель, стандартное отклонение содержания, золото-серебряное отношение – максимальные в тыловых зонах. Перечисленные макси-

мальные значения параметров распределения сочетаются с максимальными доверительными интервалами изменения средних геометрических содержаний металлов в метасоматитах тыловых зон (рис. 1, 2).

Таблица 1. Оценка параметров распределения рудогенных элементов в минерало-петрохимических зонах околорудных (рудомещающих) метасоматических ореолов золоторудных месторождений юго-восточного складчатого обрамления Сибирского кратона

Table 1. Appraisal of parameters of oreogenous elements distribution in mineral-petrochemic zones of mesothermal goldore deposits nearore (orecontaining) metasomatic haloes in south-eastern folded frame of Siberian craton

Элементы Elements	Параметры распределения Distribution parameters	Минерало-петрохимические зоны и подзоны [число проб] Mineral-Petrochemic zones and subzones [number of samples]					
		Фронтальная/ Frontal			Хлоритовая Chloritic	Альбитовая Albitic	Тыловая Rear
		Подзоны/ Subzones					
		Слабого изменения Weak alteration	Умеренного изменения Moderate alteration	Интенсивного изменения Intensive alteration			
I. Ирокиндинское месторождение/ Irokindinskoe deposit Кальцифиты (AR ₂)/ Calciphyres (AR ₂)							
Au	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	0,9(1,2)[25]	0,9(1,4)[23]	0,9(1,0)[6]	1,0(1,2)[7]	1,7(5,7)[18]	7,2(188,0)[53]
	$t(s)$	2,1(1,7)	2,3(1,9)	1,8(0,6)	1,7(0,6)	4,0(12,1)	8,4(982,7)
Ag	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	42,5(53,4)	30,9(36,1)	44,4(47,6)	52,0(70,8)	175,6(399,7)	112,0(242,0)
	$t(s)$	2,2(32,1)	1,9(20,2)	1,5(20,8)	2,8(46,8)	3,7(603,3)	3,5(408,0)
	$r(sr)$ (Au-Ag)	0,75(0,17)	0,09(0,37)	0,80(0,16)	0,03(0,50)	0,91(0,05)	0,47(0,16)
	Au/Ag	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,06
Hg	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	23,8(29,6)	21,6(32,4)	32,5(39,6)	23,4(30,3)	27,0(48,8)	41,7(64,7)
	$t(s)$	2,0(19,9)	2,3(35,3)	2,1(25,5)	2,2(24,2)	3,1(56,4)	2,7(63,6)
	$r(sr)$ (Au-Hg)	-0,36(0,33)	-0,54(0,27)	-0,06(0,45)	0,47(0,39)	0,0002(0,29)	0,24(0,19)
Альмандин-диопсид-двуполевошпатитовые гнейсы (AR ₂)/ Almandine-diopside-twofeldspathic gneisses (AR ₂)							
Au	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	0,7(1,1)[29]	0,6(0,7)[48]	0,7(0,7)[29]	0,7(0,8)[23]	16,5(47,0)[65]	49,9(228,8)[169]
	$t(s)$	2,1(1,8)	1,5(0,3)	1,5(0,3)	1,4(0,3)	4,0(94,0)	5,7(646,0)
Ag	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	35,7(43,9)	50,0(55,9)	60,3(85,3)	56,8(92,7)	153,1(222,0)	134,3(268,1)
	$t(s)$	1,8(36,8)	1,7(25,3)	2,2(95,1)	3,2(109,8)	2,3(239,8)	2,9(590,8)
	$r(sr)$ (Au-Ag)	0,73(0,12)	0,02(0,20)	0,38(0,22)	0,68(0,14)	0,82(0,06)	0,50(0,12)
	Au/Ag	0,02	0,01	0,01	0,01	0,1	0,37
Hg	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	17,1(22,0)	15,6(18,2)	19,3(34,4)	21,7(34,8)	19,7(33,4)	28,7(55,2)
	$t(s)$	2,0(17,0)	1,7(11,5)	2,4(56,5)	2,3(53,8)	2,6(47,0)	2,9(99,4)
	$r(sr)$ (Au-Hg)	-0,07(0,19)	-0,36(0,13)	-0,10(0,18)	0,04(0,27)	0,05(0,11)	0,07(0,08)
Альмандин-двуслюдяные гнейсы (AR ₂)/ Almandine-twomica gneisses (AR ₂)							
Au	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	0,5(0,6)[30]	1,2(1,4)[17]	1,9(2,5)[15]	1,7(2,4)[96]	2,3(4,1)[24]	11,5(1439,5)[34]
	$t(s)$	1,3(0,2)	1,7(0,7)	2,4(1,7)	2,3(2,4)	2,3(8,5)	21,0(1220,0)
Ag	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	36,2(43,1)	33,3(42,4)	42,5(52,4)	38,9(56,0)	76,5(91,1)	160,2(777,8)
	$t(s)$	2,2(19,3)	2,3(25,9)	2,0(32,5)	2,5(50,3)	1,9(50,2)	4,0(н/д)
	$r(sr)$ Au-Ag	0,12(0,33)	0,61(0,19)	-0,32(0,26)	0,42(0,20)	0,09(0,23)	0,72(0,12)
	Au/Ag	0,01	0,04	0,04	0,05	0,03	0,08
Hg	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	19,4(21,4)	21,2(23,4)	17,0(19,7)	18,3(20,8)	15,0(19,9)	18,3(26,4)
	$t(s)$	1,6(9,5)	1,6(10,0)	1,7(11,8)	1,6(12,5)	2,2(16,3)	2,1(33,2)
	$r(sr)$ (Au-Hg)	-0,46(0,26)	-0,23(0,29)	0,19(0,28)	0,33(0,22)	-0,33(0,20)	0,14(0,25)
Граниты мигматитовой выплавки (AR ₂)/ Granites of migmatitic melting (AR ₂)							
Au	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	0,6(0,7)[28]	0,6(0,7)[10]	0,6(0,7)[17]	1,5(1,7)[49]	6,4(23,2)[99]	50,7(335,2)[24]
	$t(s)$	1,6(0,4)	1,4(0,2)	1,4(0,2)	1,8(0,9)	4,9(45,7)	10,6(688,3)
Ag	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	47,9(70,3)	58,9(77,2)	47,3(54,8)	19,0(26,1)	96,8(122,9)	158,5(318,5)
	$t(s)$	2,4(71,6)	2,4(50,2)	1,8(27,3)	2,3(19,8)	2,2(78,2)	3,1(513,4)
	$r(sr)$ (Au-Ag)	0,18(0,27)	-0,08(0,35)	0,28(0,28)	-0,37(0,22)	0,40(0,15)	0,81(0,10)
	Au/Ag	0,01	0,01	0,01	0,07	0,06	0,32
Hg	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	20,6(24,1)	21,8(28,3)	16,2(30,1)	17,1(19,6)	27,8(41,0)	34,5(41,1)
	$t(s)$	1,7(16,6)	2,2(20,9)	2,5(55,1)	1,7(11,8)	2,4(45,9)	2,0(22,0)
	$r(sr)$ (Au-Hg)	-0,15(0,27)	-0,58(0,24)	-0,20(0,29)	0,49(0,20)	0,14(0,18)	0,02(0,23)
Микрогранит-порфиры фельзитовые дайковые (PZ ₃)/ Microgranite-parphyres felsitic dikes (PZ ₃)							
Au	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	н/д	н/д	1,2(1,4)[6]	1,4(1,9)[37]	3,6(17,4)[120]	43,1(269,5)[64]
	$t(s)$	н/д	н/д	1,8(1,0)	2,0(1,8)	4,9(53,8)	9,0(736,4)
Ag	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	н/д	н/д	24,4(24,6)	н/д	132,7(168,4)	143,8(164,3)
	$t(s)$	н/д	н/д	1,1(3,0)	н/д	1,8(160,0)	1,7(92,9)
	$r(sr)$ (Au-Ag)	н/д	н/д	0,48(0,34)	н/д	н/д	н/д
	Au/Ag	н/д	н/д	0,05	н/д	0,03	0,3
Hg	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	н/д	н/д	н/д	22,3(29,0)	38,2(54,0)	43,8(62,4)
	$t(s)$	н/д	н/д	н/д	2,0(26,2)	2,4(44,7)	2,2(68,7)
	$r(sr)$ (Au-Hg)	н/д	н/д	н/д	0,07(0,21)	0,43(0,23)	0,15(0,15)

Окончание табл. 1

Table 1

Элементы Elements	Параметры распределения Distribution parameters	Минералого-петрохимические зоны и подзоны [число проб] Mineral-Petrochemic zones and subzones [number of samples]					
		Фронтальная/ Frontal			Хлоритовая Chloritic	Альбитовая Albitic	Тыловая Rear
		Подзоны/ Subzones					
		Слабого изменения Weak alteration	Умеренного изменения Moderate alteration	Интенсивного изменения Intensive alteration			
II. Кедровское месторождение/ Kedrovskoe deposit Кварцевые диориты очагово-купольной постройки (PZ ₃)/ Quartz diorites of hearth-dome structure (PZ ₃)							
Au	$\bar{xz}(\bar{x})$	0,7(0,8)[25]	0,7(0,8)[25]	0,8(1,0)[6]	1,4(1,7)[17]	1,5(2,3)[20]	3,6(3,8)[6]
	$t(s)$	1,4(0,4)	1,4(0,4)	2,1(1,1)	1,8(1,1)	2,6(2,4)	1,5(1,4)
Ag	$\bar{xz}(\bar{x})$	19,8(26,0)	19,8(26,0)	27,1(28,7)	34,0(33,6)	24,7(36,8)	46,4(47,2)
	$t(s)$	1,9(27,0)	1,9(27,0)	1,4(11,9)	2,4(75,6)	2,5(36,3)	1,2(9,2)
	$r(sr)$ (Au-Ag)	0,55(0,16)	0,55(0,16)	0,93(0,05)	0,16(0,24)	0,35(0,21)	0,69(0,21)
	Au/Ag	0,03	0,03	0,03	0,04	0,06	0,08
Hg	$\bar{xz}(\bar{x})$	18,0(19,3)	18,0(19,3)	24,2(29,3)	17,3(17,8)	19,6(32,2)	25,7(39,3)
	$t(s)$	1,5(7,9)	1,5(7,9)	2,0(19,5)	1,3(4,6)	2,3(53,2)	2,7(38,4)
	$r(sr)$ (Au-Hg)	-0,15(0,23)	-0,15(0,23)	-0,41(0,34)	-0,04(0,24)	0,13(0,23)	0,94(0,05)
Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые песчано-алевросланцы кедровской свиты (R ₃) Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz sandstone-aleurolsates of kedrovskaja suite (R ₃)							
Au	$\bar{xz}(\bar{x})$	1,2(1,6)[37]	0,7(1,5)[15]	1,1(1,7)[23]	1,8(2,6)[123]	3,9(6,9)[209]	5,8(15,3)[27]
	$t(s)$	2,1(1,5)	2,9(2,7)	2,7(1,6)	2,0(4,0)	2,8(9,5)	4,5(19,9)
Ag	$\bar{xz}(\bar{x})$	26,7(32,1)	23,3(26,0)	56,6(91,7)	61,7(165,1)	135,8(223,4)	165,0(278,5)
	$t(s)$	1,9(20,9)	1,6(13,9)	2,6(116,6)	4,6(340,4)	2,6(359,5)	3,1(257,0)
	$r(sr)$ (Au-Ag)	0,001(0,2)	0,79(0,11)	0,22(0,21)	0,21(0,12)	0,11(0,09)	0,44(0,16)
	Au/Ag	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04
Hg	$\bar{xz}(\bar{x})$	18,0(26,3)	28,3(34,7)	22,0(30,4)	24,5(34,1)	17,5(23,5)	30,5(36,0)
	$t(s)$	2,8(20,7)	2,1(18,7)	2,2(27,0)	2,4(30,1)	2,1(20,6)	1,8(21,4)
	$r(sr)$ (Au-Hg)	0,35(0,16)	0,50(0,22)	0,20(0,21)	-0,15(0,12)	-0,11(0,08)	0,58(0,13)
III. Каралонское месторождение/ Karalonskoe deposit Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые песчано-алевросланцы водораздельной свиты (R ₃) Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz sandstone-aleurolsates of vodorazdel'naja suite (R ₃)							
Au	$\bar{xz}(\bar{x})$	1,0(1,1)[15]	н/д	1,6(2,0)[11]	2,0(2,8)[34]	2,0(3,5)[7]	24,7(73,5)[6]
	$t(s)$	1,6(0,4)	н/д	1,9(1,8)	2,4(2,6)	2,8(5,1)	5,6(100,9)
Ag	$\bar{xz}(\bar{x})$	25,1(35,1)	н/д	34,9(64,7)	45,6(65,1)	29,4(44,5)	53,3(60,2)
	$t(s)$	2,2(34,8)	н/д	2,9(99,3)	2,4(75,0)	2,9(39,9)	1,8(29,6)
	$r(sr)$ (Au-Ag)	0,56(0,18)	н/д	0,73(0,14)	0,52(0,12)	0,80(0,13)	0,70(0,21)
	Au/Ag	0,04	н/д	0,04	0,04	0,07	0,4
Hg	$\bar{xz}(\bar{x})$	32,4(37,3)	н/д	47,0(49,0)	58,0(68,6)	42,2(61,6)	44,6(46,5)
	$t(s)$	1,8(19,2)	н/д	1,4(14,8)	1,7(61,4)	2,5(63,5)	1,4(16,3)
	$r(sr)$ (Au-Hg)	0,12(0,25)	н/д	-0,007(0,30)	-0,22(0,16)	0,55(0,26)	-0,30(0,37)
IV. Ирокидинский прогиб/ Irokindinskii trough Углеродистые мусковит-биотитовые алевро-пелитосланцы мухтунной свиты (R ₃) Carbonaceous muscovite-biotitic aleuro-pelitoslates of muhtunnaja suite (R ₃)							
Au	$\bar{xz}(\bar{x})$	н/д	н/д	н/д	0,6(0,6)[39]	0,6(0,7)[24]	1,0[1]
	$t(s)$	н/д	н/д	н/д	1,6(0,3)	1,6(0,5)	н/д
Ag	$\bar{xz}(\bar{x})$	н/д	н/д	н/д	14,7(16,2)	19,8(25,7)	19,0
	$t(s)$	н/д	н/д	н/д	1,6(7,1)	2,1(19,0)	н/д
	$r(sr)$ (Au-Ag)	н/д	н/д	н/д	0,27(0,15)	0,53(0,15)	н/д
	Au/Ag	н/д	н/д	н/д	0,04	0,03	н/д
Hg	$\bar{xz}(\bar{x})$	н/д	н/д	н/д	15,1(17,8)	16,6(18,1)	12,5
	$t(s)$	н/д	н/д	н/д	1,8(10,4)	1,5(7,9)	н/д
	$r(sr)$ (Au-Hg)	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д

Примечание. Здесь и в табл. 2–5: 1) $\bar{xz}(\bar{x})$ – среднее соответственно геометрическое и арифметическое содержание, мг/т; t – стандартный множитель; s – стандартное отклонение содержаний, мг/т; r – коэффициент парной линейной корреляции элементов с золотом, выше уровня значимости обозначен жирным шрифтом; sr – стандартное отклонение коэффициента корреляции; н/д – нет данных. 2) В квадратных скобках – число проб. 3) Содержание Au и Ag определялось атомно-абсорбционным методом (чувствительность 0,1 мг/т) в лаборатории ядерно-физических методов анализа вещества ОИГГМ СО РАН (г. Новосибирск), аналитик В.Г. Цимбалист. Содержание Hg определялось атомно-абсорбционным методом (чувствительность 5 мг/т) в ЦЛ ПГО «Березовгеология» (г. Новосибирск) под руководством Н.А. Чарикова. 4) Расчеты выполнены Н.П. Ореховым.

Note. Here and in the tables 2–5: 1) $\bar{xz}(\bar{x})$ are the moderate geometric and arithmetic content accordingly, mg/t; t is the standard multiplication; s is the standard digression of the contents, mg/t; r is of couple linear correlation elements coefficient with gold, higher than the significance level is designated by bold type; sr is the standard digression of the correlation coefficient; n/d – no data. 2) In square brackets – the number of samples. 3) The content of Au and Ag were determined by means of atomic-absorption method (the revelation limit is 0,1 mg/t) in the laboratory of Siberian Section RAS Institute Geology, Geophysics and Mineralogy (Novosibirsk) by guidance of V.G. Tsimbalist, the content of Hg – by means of atomic-absorption method (the revelation limit is 5 mg/t) in the laboratory of Bereozovgeology (Novosibirsk) by guidance of N.A. Charkov. 4) The calculations were fulfilled by N.P. Orekhov.

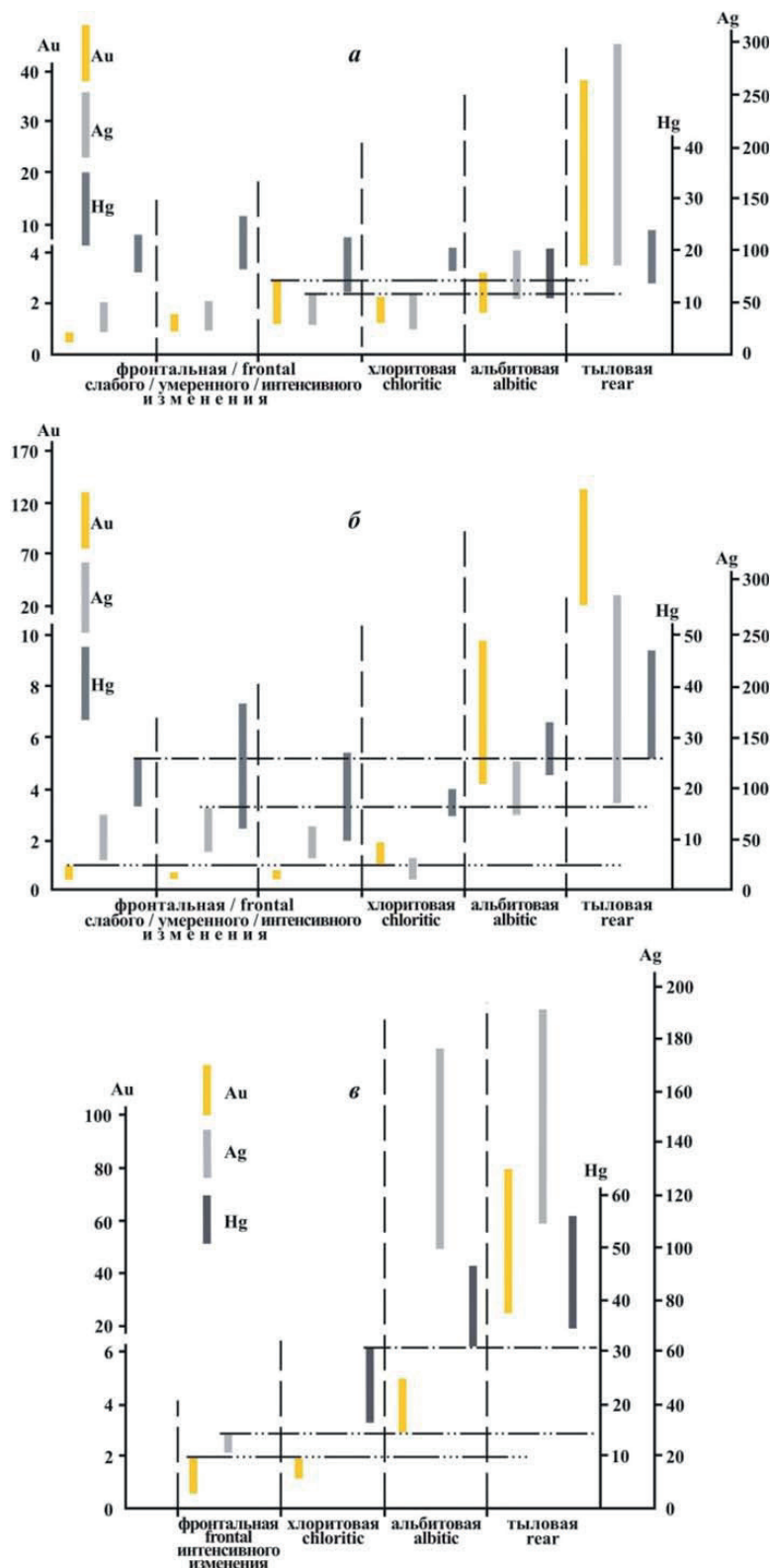


Рис. 1. Доверительные интервалы изменений среднего геометрического содержания золота, серебра, ртути (мг/т) в минерало-петрохимических зонах околорудных метасоматических ореолов, образованных в альмандин-тремолитовом гнейсе (а), граните мигматитовой выплавки (б), дайках фельзитовых микрогранит-порфиров (в) Ирокиндинского месторождения (при 5 % уровне значимости)

Fig. 1. Trust (ing) alteration intervals of average geometric content of gold, silver, mercury (mg/t) in mineral-petrochemic zones of nearore metasomatic haloes formed in almandine-tremolite gneisses (a), granite migmatitic melting (б), felsitic microgranite-porphyr dikes (в) of Irokindinskoe deposit (attached to 5 per cent level of significance)

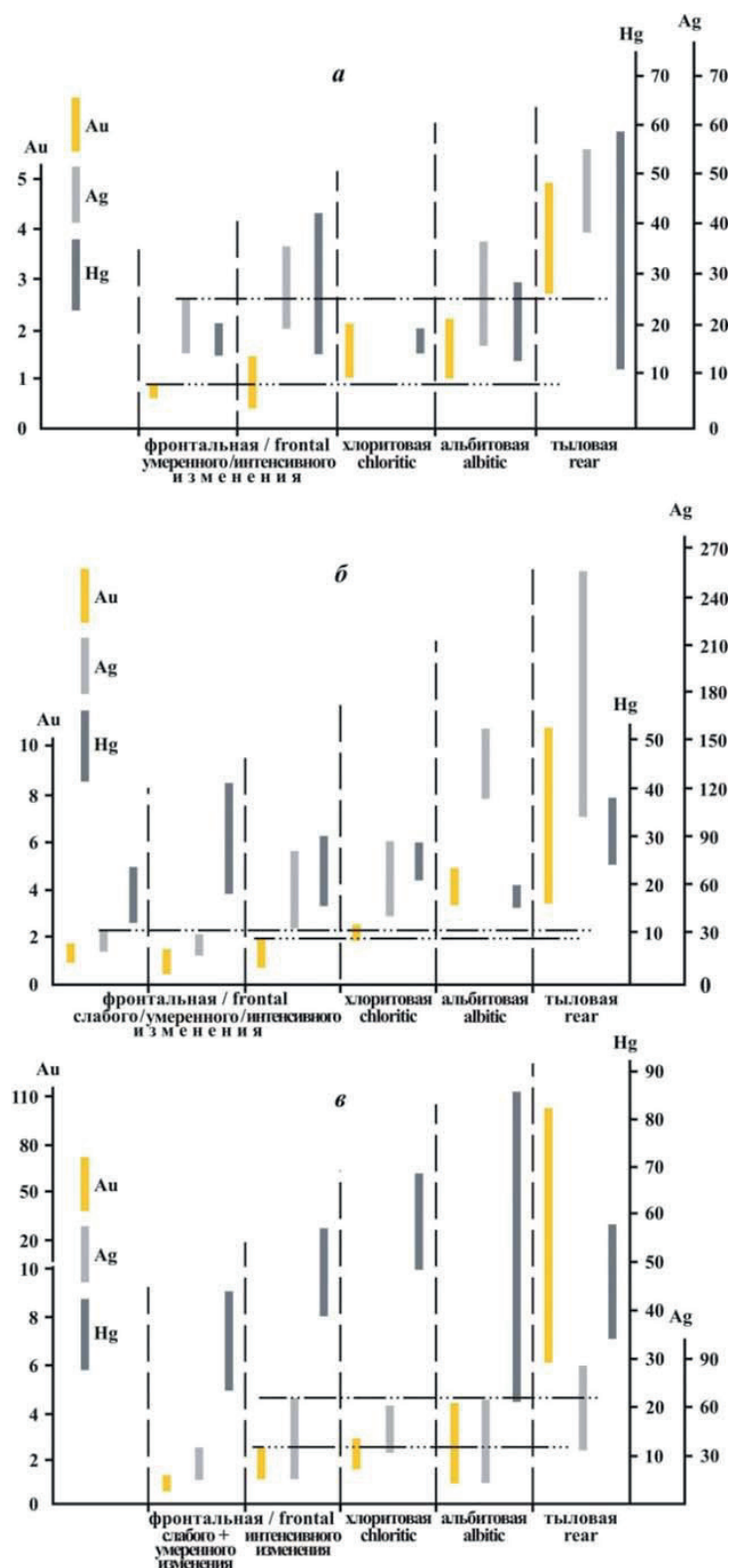


Рис. 2. Доверительные интервалы изменений среднего геометрического содержания золота, серебра, ртути (мг/т) в минералогическо-петрохимических зонах околорудных метасоматических ореолов, образованных в кварцевом диорите (а), углеродистых песчано-алевро-сланцах кедровской (б) Кедровского и углеродистых песчано-алевро-сланцах водораздельной (в) Каралонского месторождений толщ (свит) (при 5 % уровне значимости)

Fig. 2. Trust (ing) alteration intervals of average geometric content of gold, silver, mercury (mg/t) in mineral-petrochemic zones of near-ore metasomatic haloes formed in quartz diorite (a), carbonaceous sandstone-aleurolites of kedrovskaya (б), Kedrovskoe and in carbonaceous sandstone-aleurolites of vodorazdelnaya (в) Karalonskoye deposits suites (attached to 5 per cent level of significance)

Содержания металлов в метасоматитах образования рудных столбов, образованных в золото-рудных кварцевых жилах и залежах жильно-прожилково-вкрапленных руд, особенно обогащенных сульфидами, всегда выше (табл. 1, колонки Ирокиндинского месторождения) сравнительно с участками рудных тел или рудными телами с рядовыми содержаниями (до 10 г/т) золота (табл. 1, колонки Кедровского, Каралонского месторождений). Основная масса золота и серебра осаждается в тыловых альбитовой и особенно березитовой зонах. В породах, в частности в черных сланцах позднерифейской мухтунной свиты в Ирокиндинском прогибе, не содержащих рудных тел, содержания металлов и в тыловых зонах метасоматических колоннок остаются на субкларковых уровнях (табл. 1).

Таблица 2. Оценка параметров распределения рудогенных элементов в минерало-петрохимических зонах рудовмещающего метасоматического ореола золоторудного месторождения Сухой Лог (Западный участок)

Table 2. Appraisal of the parameters of oreogenous elements distribution in mineral-petrochemic zones of mesothermal goldore Sukhoi Log deposit (Western section) orecontaining metasomatic halo

Элементы Elements	Параметры распределения Distribution parameters	Углеродистые филлиты, песчаники, алевро-сланцы имняхской свиты (R ₃) Carbonaceous phyllites, sandstones, aleuro-slates imniahskaia suite (R ₃)			
		Минеральные зоны [число проб] Mineral zones [number of samples]			
		Хлоритовая/Chloritic		Альбитовая/Albitic	
		Без сульфидов [19] Without sulphides	С сульфидами [6] With sulphides	Без сульфидов [11] Without sulphides	С сульфидами [10] With sulphides
Au	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	3,4 (3,5)	10,1 (10,3)	3,9 (5,0)	20,9 (35,3)
	$t(s)$	1,4 (1,3)	1,2 (2,4)	2,0 (4,3)	2,7 (49,0)
Ag	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	26,9 (28,3)	40,3 (45,7)	29,1 (33,5)	63,2 (65,6)
	$t(s)$	1,4 (8,9)	1,7 (23,8)	1,8 (19,8)	1,3 (20,2)
	$r(\text{Au-Ag})$	-0,01	0,5	0,2	0,4
	Au/Ag	0,13	0,25	0,13	0,33

На западной периферии месторождения Сухой Лог карьером и скважинами вскрыты залежи жильно-прожилково-вкрапленных руд в промежуточных хлоритовой и смежной с тыловой альбитовой зонах крупнообъемной метасоматической колонки, образованной в черных сланцах имняхской и хомолхинской свит позднего рифея. Обычное в этом и подобных условиях неравномерное распределение в метасоматитах сульфидов – носителей значительной части золота и серебра – обеспечило дифференциацию проб на содержащие сульфиды, среди которых преобладает золотоносный пирит с редкой несущественной примесью галенита, сфалерита и других, и бессульфидные. Результаты анализов и их обработки (табл. 2) подтвердили общую закономерность – усиление интенсивности метасоматических преобразований пород сопровождается возрастанием содержаний того и другого металла при изменении количественных соотношений золота и серебра в пользу золота.

Таблица 3. Оценка параметров распределения рудогенных элементов в минерало-петрохимических зонах рудовмещающего метасоматического ореола Вернинского золоторудного месторождения

Table 3. Appraisal of the parameters of oreogenous elements distribution in mineral-petrochemic zones of mesothermal Ver-ninskoe goldore deposit orecontaining metasomatic halo

Элементы Elements	Параметры распределения Distribution parameters	Минеральные зоны/Mineral zones			
		Альбитовая /Albitic		Березитовая/Beresitic	
		Исходные горные породы /Initial rocks			
		Углеродистые песчаники без сульфидов [число проб] Carbonaceous sandstones without sulphides [12]	Углеродистые песчаники с сульфидами [число проб] Carbonaceous sandstones with sulphides [137]	Углеродистые песчаники с сульфидами [число проб] Carbonaceous sandstones with sulphides [76]	Углеродистые алевролиты с сульфидами [число проб] Carbonaceous aleurolites with sulphides [13]
Au	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	2,3 (2,4)	13,0 (23,6)	39,2 (309,0)	37,0 (55,0)
	$t(s)$	1,3 (0,55)	2,5 (47,1)	4,8 (1187)	2,6 (52,1)
Ag	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	33,5 (38,3)	52,3 (65,4)	78,6 (125,0)	143,7 (187,5)
	$t(s)$	1,7 (20,6)	1,8 (67,0)	2,2 (198,0)	2,2 (145,0)
	$r(\text{Au-Ag})$	0,22	0,44	0,61	0,81
	Au/Ag	0,07	0,25	0,50	0,26
Hg	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	15,9 (29,0)	н/д	78,7 (262,0)	н/д
	$t(s)$	5,1 (25,1)	н/д	6,3 (483,0)	н/д
	$r(\text{Au-Hg})$	0,56	н/д	0,30	н/д
	$r(\text{Ag-Hg})$	0,90	н/д	0,63	н/д

В соседнем с Сухим Логом генетически однотипном с ним Вернинском месторождении, во вскрытом карьером и скважинами объеме которого залежи жильно-прожилково-вкрапленных руд образованы в альбитовой и тыловой березитовой зонах рудовмещающего метасоматического ореола, параметры распределения золота, серебра, ртути увеличены в тыловой зоне сравнительно со смежной альбитовой зоной ореола, образованного среди углеродистых песчаников и алевролитов аунакитской свиты позднего рифея (табл. 3). Как и в других месторождениях, в том числе в Сухом Логу, содержания металлов, включая ртуть, в бессульфидных черных сланцах и апосланцевых метасоматитах в удалении от рудных столбов и рудо-контролирующих (раствороподводящих) разломов в хлоритовой и нередко, как в данном случае, в альбитовой зонах не выходят за пределы субкларковых значений.

В месторождении Чертово Кoryто, расположенном в Патомском нагорье в 150 км к северу от месторождения Сухой Лог, образованном в толще переслаивающихся углеродистых разнозернистых, тонко-мелкозернистых песчаников, алевролитов, аргиллитов раннепротерозойской михайловской свиты, пробы горных пород по техническим причинам не дифференцированы по содержанию сульфидов, участвующих в форме редкой тонкой вкрапленности. Крупная залежь жильно-прожилково-вкрапленных руд месторождения образована в объеме, сложенном метасоматитами углеродистой (хлоритовой с керогеном), хлоритовой (без керогена), альбитовой, тыловой березитовой зон,

Таблица 4. Оценка параметров распределения рудогенных элементов в минералого-петрохимических зонах рудовмещающего метасоматического ореола золоторудного месторождения Чертово Кoryто

Table 4. Appraisal of the parameters of oreogenous elements distribution in mineral-petrochemic zones of mesothermal goldore Chertovo Koryto deposit orecontaining metasomatic halo

Элементы Elements	Параметры распределения Distribution parameters	Исходные горные породы и минеральные зоны [число проб]/Initial rocks and mineral zones [number of samples]					
		Углеродистая/Carbonaceous				Хлоритовая Chloritic [39]	Березитовая Beresitic [18]
		Разнозернистые песчаники Different granular sandstones [58]	Тонко-мелко-зернистые песчаники Thin-finegranular sandstones [94]	Алевриты Aleurolites [24]	Аргиллиты Argillites [23]		
Au	$\bar{x}(\bar{x})$	7,3 (60,7)	7,7 (37,5)	5,6 (22,8)	5,1 (12,4)	16,0 (82,7)	22,1 (93,5)
	$t(s)$	4,9 (231,1)	4,5 (105,1)	4,2 (59,3)	3,4 (23,6)	5,1 (210,2)	5,6 (163,1)
Ag	$\bar{x}(\bar{x})$	77,9 (104,4)	78,5 (89,7)	72,0 (81,5)	87,8 (152,9)	81,0 (122,0)	84,9 (115,1)
	$t(s)$	1,9 (145,4)	1,7 (52,4)	1,7 (39,0)	2,6 (244,6)	2,1 (193,1)	2,1 (122,3)
	r	0,44	0,33	-0,05	-0,03	0,50	0,24
	Au/Ag	0,09	0,10	0,08	0,058	0,19	0,26

многократно чередующихся в разрезе. Примесь золотоносных сульфидов сообщает породам повышенные против кларка содержания золота и серебра уже в углеродистой зоне, возрастающие, хотя и несущественно, в промежуточной хлоритовой и тыловой зонах рудовмещающей метасоматической колонки в сопровождении незначительно возрастающих стандартного множителя и стандартного отклонения содержания (табл. 4). Как обычно в березитовой зоне усиливается положительная корреляционная связь золота с серебром и возрастает золото-серебряное отношение.

тально с объемными подрудным и надрудным уровнями объемный рудный уровень выделяется более чем на порядок высоким содержанием в метасоматитах золота, более высоким содержанием серебра и мышьяка, на порядок более высоким золото-серебряным отношением, повышенным золото-мышьяковым отношением. Перечисленными параметрами распределения в метасоматитах металлов, которые согласуются с таковыми тыловых минералого-петрохимических зон рудовмещающих метасоматических ореолов, оконтуривается рудная залежь месторождения.

Таблица 5. Оценка параметров распределения рудогенных элементов в гидротермально измененных породах промежуточных и тыловых минералого-петрохимических зон рудовмещающего метасоматического ореола месторождения Чертово Кoryто на различных гипсометрических уровнях

Table 5. Appraisal of the parameters of oreogenous elements distribution in hydrothermal altered rocks of the Chertovo Koryto deposit orecontaining metasomatic halo intermediate and rear mineral-petrochemic zones on different hypsometric levels

Элементы Elements	Параметры распределения Distribution parameters	Гипсометрические уровни [число проб] Hypsometric levels [number of samples]		
		Подрудный Underore [162]	Рудный Ore [440]	Надрудный Overore [289]
Au	$\bar{x}(\bar{x})$	50,0(208,8)	759,2(1505,3)	11,0(159,1)
	$t(s)$	9,4(390,6)	5,4(3655,2)	13,3(661,9)
Ag	$\bar{x}(\bar{x})$	130,5(187,2)	175,1(277,4)	119,7(245,5)
	$t(s)$	2,0(267,2)	2,3(475,2)	1,8(1763,4)
As	Au/Ag	0,38	4,00	0,08
	$\bar{x}(\bar{x})$	80(602)	436(1447)	40(118)
	$t(s)$	5,0(1817)	5,2(2470)	3,0(516)
As	Au/As	0,0006	0,0018	0,00025

Объемная геохимическая зональность месторождения, выраженная в закономерном изменении параметров распределения металлов в промежуточных и тыловых минералого-петрохимических зонах рудовмещающего метасоматического ореола, сочетается с объемной геохимической зональностью, выраженной в закономерном изменении параметров распределения рудогенных золота, серебра, мышьяка – геохимического спутника золота на подрудном, рудном, надрудном гипсометрических уровнях (табл. 5). В частности, сравни-

Обсуждение и выводы

Доказанное предшественниками-профессионалами [1–4] участие в составе околорудных (рудовмещающих) метасоматических ореолов в месторождении Сухой Лог и других золоторудных месторождениях «черносланцевого типа» Ленского района метасоматитов сопряженных березитовой и пропиловитовой формаций служит одним из важнейших, наряду с другими, доказательств вещественно-генетической однородности оруденения, образованного в черносланцевом и кристаллическом субстрате. Поскольку образование березитов не было предусмотрено предложенной в середине прошлого столетия метаморфогенно-гидротермальной гипотезой, но разработчикам гипотезы надо было поддерживать ее как отличную от других гипотез «на плаву», то есть в конкурентоспособном состоянии, возникла потребность искать основания для опровержения факта образования березитов в черных сланцах в процессах околорудного метасоматизма и ограничиться пропилитами, «трансформировав» их в производные регионального метаморфизма гидратации фации зеленых сланцев. Атаки на березиты не замедлили себя ждать.

Первая попытка опровержения выводов предшественников о березитовом (березит-лиственитовом) профиле околорудных метасоматитов Сухого Лога и Ленского золотоносного района предпринята авторами идеи метаморфогенно-гидротермального рудообразования [5, 6], в том числе [6] на основе петрохимических пересчетов 482 химических силикатных анализов проб, объединенных в

выборки по несколько десятков проб в каждой с учетом гипсометрического уровня опробования, литологического состава исходных пород (песчаники, алевролиты), расстояния отбора проб от жил и рудных зон.

Указание на учет принадлежности проб к субфациям регионального метаморфизма гидратации (биотит-хлоритовой, хлорит-серицитовой) сочетается с дифференциацией проб по степени измененный пород на «исходные», «слабо измененные», «интенсивно измененные» без описания их минеральных составов, минеральных преобразований, количественных оценок интенсивности изменений, и поэтому выборки представляются сформированными некорректно. Методически некорректно также рассчитывать баланс петрогенных и рудных компонентов, то есть искать внешние или внутренние (местные породные на уровнях опробования) источники вещества для жил и жильных зон, определяя средний химический состав каждой пробы, «...исходя из среднего состава и степени распространенности (представительности) в ее складывающих ее образований, в том числе кварцевых жил и в различной степени измененных пород» (разрядка наша, – И.К.) [6, с. 137]. Невозможно, скажем, судить о выносе кремнезема из измененной породы и об образовании за счет вынесенного кремнезема кварцевой жилы – обычного явления в процессе березитизации, смешивая, как это выполнял и рекомендовал В.А. Буряк, материал этой породы и кварцевой жилы в одну пробу – вынос кремнезема из измененной породы не будет зафиксирован. Поэтому вывод В.А. Буряка, согласно которому «...широко распространенные ранее представления ... о том, что рассматриваемые процессы по химизму характеризуются исключительным постоянством, проявляются в постоянном привносе калия и углекислоты и выносе кремнезема и натрия при относительной стабильности содержания других элементов, очевидно, не могут быть приняты» [6, с. 143], не очевиден, напротив, ведет к запутыванию вопроса, так как на такого рода некорректных выводах основано противопоставление В.А. Буряком (и не только) минералого-петрохимической сущности окolorудных изменений черных сланцев, с одной стороны, и разнообразных пород в магматогенно-гидротермальных месторождениях, с другой.

В.А. Русинов с соавторами, позднее диагностировавшие в Сухом Логу минеральный состав участвующего в окolorудном метасоматическом ореоле месторождения метасоматита, отрицают факт участия березита, ссылаясь на отсутствие в окolorудной метасоматической колонке еще более тыловой, чем березитовая, кварц-серицитовая зоны [7]. Последняя существует в модели, следующей из теории метасоматической зональности Д.С. Коржинского, но в природных окolorудных (рудовмещающих) метасоматических ореолах рудных месторождений образованию тыловой двухминеральной кварц-серицитовая зоны препятствует не уч-

тенная в теории встречающаяся, из трещинных растворов в поровые, диффузия компонентов, формирующая полиминеральный состав в том числе тыловой, а не только промежуточной, согласно теории, зоны [8], в данном случае отвечающий полиминеральному березиту.

Как известно и следует из приведенных материалов, зональная структура окolorудных метасоматических ореолов месторождения Сухой Лог и других обсуждаемых месторождений «черносланцевого типа» по минералого-петрохимическому содержанию не составляет исключения из зональной структуры типовой минералого-петрохимической зональности окolorудных метасоматических ореолов мезотермальных месторождений золота, урана, цветных металлов, образованных и в кристаллическом субстрате [8, 9], отвечающих в том и другом субстрате сочетанию березитовой в тыловых и пропиловитовой в периферийных зонах формаций. Апочерносланцевые метасоматиты месторождения в обрамлении рудоконтролирующего растворопроводящего глубинного Кадали-Сухоложского разлома обогащены углекислотой, восстановленной серой, калием, фемофильными элементами в ассоциации – магнием, железом, титаном, фосфором, зафиксированными в обильных магнезиально-железистых карбонатах, лейкоксене, рутиле, апатите, а также обогащены [10], в опровержение утверждения об отсутствии в месторождении окolorудных геохимических ореолов [11], золотом, серебром, платиной, палладием, никелем, кобальтом, хромом, цинком, свинцом, медью, редкими землями, вольфрамом, молибденом, цирконием. Каждый из этих металлов образует собственные многочисленные минеральные фазы.

На основе изотопных отношений углерода, серы, редкоземельных радиогенных элементов реконструированы два источника металлов и доставивших их в образующееся месторождение флюидов, один из которых глубинный [12]. По заключениям Н.П. Лаверова с коллегами, в область рудоотложения поступили с металлоносными флюидами CO_2 , золото, платина, вольфрам, молибден, редкие земли, никель, кобальт, хром, свинец, цинк, В.В. Дистлера с коллегами [13] – в составе руд участвуют самородные железо, олово, свинец, титан, монацит.

Доказанная в месторождениях «сухоложского» типа прямая корреляционная связь между содержаниями золота и металлов платиновой группы [14], участие в окolorудных (рудовмещающих) метасоматических и геохимических ореолах и рудах никелистого хлорита [15], рутит [16–18], подчиняющейся (рис. 1, 2) окolorудной метасоматической зональности, – факты, которые служат дополнительными индикаторами генетической связи золотого оруденения с базитовым магматизмом.

После всего, что выполнили предшественники в исследовании обсуждаемой проблемы, утверждение отсутствия в Сухом Логу и, очевидно, в других месторождениях «сухоложского типа» окolorуд-

ных метасоматических и геохимических ореолов [11] не отвечает реальной ситуации, но согласуется с новой эксгальационно-осадочной версией образования этих месторождений и, вероятно, продиктовано необходимостью защищать эту версию.

Если природа создала месторождения по эксгальационно-осадочному сценарию, но мало похожие на ножки «грибов» пологие залежи жильно-прожилково-вкрапленных руд с секущими стратификацию вмещающих толщ черных сланцев контурами [11] представляют, согласно версии, верхнюю осадочную стратиформную составляющую собственных месторождений типа куроко грибообразных рудных тел («шляпки») без гидротермально-метасоматических «ножек», окологрудных метасоматических березитовой формации и геохимических ореолов – неперенных спутников гидротермально-метасоматических руд не должно быть. Поскольку те и другие ореолы существуют, остается предположить, что более чем четырехкилометровая по пологому падению Главная рудная залежь Сухого Лога и другие подобные менее объемные залежи этого месторождения, следующие рудоконтролирующему (раствороподводящему) Кадали-Сухоложскому глубинному разлому, образованы как гидротермально-метасоматические в породах придонной области конседиментационного прогиба под термодинамическим и физико-химическим барьером, созданным в придонной области толщей океанских (морских) вод и грунтовыми водами ниже дна. В таком случае весь ансамбль накопленных в Ленском районе фактов следует соотносить с этим выводом. В любом случае факты нельзя отменять или о них «забывать», а надо их использовать в обоснование или опровержение предложенных версий.

Выводу о гидротермально-метасоматическом происхождении рудных залежей Сухого Лога противоречит факт образования в них слойчатой текстуры породы (руды?), в которой слойки (не эпигенетические полоски?, – И.К.) сульфидов чередуются со слойками силикатов черных сланцев и которая призвана [11] служить признаком осадочного их (залежей) происхождения. Поскольку, согласно сформулированному предположению, рудные залежи могли быть образованы только в породах ниже дна водоема, но в непосредственной от него близости, можно допустить достижение холодных придонных вод отдельными струями общего потока поднимающихся горячих металлонесных растворов, смешение последних с придонными водами, нарушение химического равновесия в смеси и, как следствие, осаждение на дно растворенного вещества в верхних частях образующихся гидротермально-метасоматических залежей на локальных участках функционирования «черных курьльчиков».

Если этот сценарий с учетом обычного явления в осадочном процессе – колебательных движений (воздымание, погружение) дна водоемов – реализован природой, представление о гидротермально-

метасоматическом происхождении рудных залежей с фрагментами осадочной составляющей нет оснований отменять.

В свою очередь, популярному представлению о метаморфогенно-гидротермальном происхождении оруденения в черных сланцах [19–37] Ленского района противоречат данные, раскрывающие последовательность геологических событий посредством радиологических определений их возраста. Н.П. Лаверов с соавторами свидетельствуют [12, 38]: рудовмещающие толщи черных сланцев образованы около 1000 млн л. назад, их региональный метаморфизм нагревания происходил 510 ± 30 млн л. назад, возраст метасоматических рудных залежей составляет 440 млн л., золотоносных кварцевых жил – 315 ± 15 млн л. Приходится предположить возраст залежей завышенным, так как он определен по валовым пробам, содержащим древний мусковит и биотит этапа регионального метаморфизма нагревания мусковит-биотитовой ассоциации фации зеленых сланцев, и более молодой мусковит-серицит этапа окологрудного (околожильного) метасоматизма с их Rb-Sr системами. Один мусковит от другого не отделим. Скорее всего, возраст рудных залежей и продуктивных жил близок – они образованы в одном с выносом из пород образующего кварцевые жилы кремнезема процессе, хотя в монофракции околожильного мусковита-серицита также нельзя исключать участие древнего и молодого минерала, но без биотита, который в околожильном березите полностью замещен мусковитом-серицитом. Значительный возрастной перерыв между этапами регионального метаморфизма и рудообразования, следующий из этих данных, исключает участие ранних метаморфических процессов в создании более поздних месторождений золота.

В последовательности геологических событий, непосредственно предшествовавших образованию мезотермальных генетически однородных месторождений золота в кристаллическом субстрате и толщах черных сланцев и сопровождавших его [39–43], природа оставляет следы, раскрывающие, в частности, пространственно-временные и причинно-следственные соотношения рудообразования с магматизмом.

В Ленском районе следы материализованы в составе антидормного гранит-диорит-долеритового флюидно-рудно-магматического комплекса, включающего не вскрытый эрозией массив гранитоидов под месторождением Сухой Лог, связанный с ним, но выходящий на дневную поверхность гранитный Константиновский шток, сопровождающие массив многочисленные дорудные дайки средне-кислых пород аглан-янского комплекса, поздние ассоциации чередующихся по времени образования с рудно-минеральными комплексами базитовых даек кадали-бутуинского комплекса. K-Ar возраст биотита гранитоидов штока составляет 300 ± 20 млн л., Sm-Nd возраст (по валовым пробам) базитовых даек – 312 ± 59 млн л. [44].

В числе базитовых даек С.Д. Шером описаны дожилые и послезильные [45].

Дожильные дайки содержат многочисленные кварцевые прожилки, гидротермально изменены. Реликтовые порфировые вкрапленники плагиоклаза, оливина, пироксена частично замещены псевдоморфными агрегатами альбита, хлорита, магнезиально-железистых карбонатов; цемент сложен теми же минералами с примесью кварца и пирита. Пирит и магнезиально-железистые карбонаты по размерам кристаллов-ромбоэдров, составу, содержанию элементов-примесей (серебра, цинка, свинца, висмута и других) аутентичны этим же минералам, образованным в составе апочерносланцевых околорудных березитов.

Послезильные дайки не содержат кварцевых прожилков, в контактах с кварцем сопровождаются зонами закалки. Сложены реликтовыми магматическими минералами – плагиоклазом-лабрадором (до 15 об. %), авгитом (до 30 об. %), магнетитом, гранатом, новообразованными минералами в ассоциации зеленовато-бурого, грязно-зеленого биотита (до 40 об. %), обыкновенной роговой обманки (до 10 об. %), цоизита, апатита, магнетита, пирита, хлорита, серицита, кальцита, магнезиально-железистых карбонатов. Биотит и другие перечисленные минералы частично замещают роговую обманку, лабрадор, авгит. Описанные дайки, первоначально диагностированные С.Д. Шером [45] как лампрофиры, впоследствии переквалифицированы в диабазы (долериты) [46], подвергшиеся метасоматическим преобразованиям с обогащением аподолеритовых метасоматитов калием в биотите (до 5,36 мас. %), углекислотой (CO_2) в карбонатах (до 1,06 мас. %), магнием (MgO) (до 16,65 мас. %) и снижением содержания натрия (Na_2O) (до 0,07 мас. %) и кремнезема. С усилением степени гидротермальных изменений даек в аподайковых метасоматитах возрастает содержание золота – от 1,3 мг/т (21 проба) в слабо измененных до 11 мг/т (22 пробы) в интенсивно измененных.

Ранняя, этапа метасоматизма, ассоциация высокотемпературных биотита и обыкновенной роговой обманки базитовых (послезильных по С.Д. Шеру) даек, преобразованных в метасоматиты среди не измененных гранитов, черных сланцев и других пород, пересекающих ранние рудно-минеральные комплексы и пересекаемых поздними, выполняющих в числе базитовых даек других (дорудных, послерудных) генераций опережающие рудоконтролирующий Кадали-Сухоложский глубинный разлом структуры [47], служит в согласии с известным физическим явлением [48, 49] индикатором аккумулярующей в горячем состоянии среди холодных пород горячие металлоносные растворы и флюидопроводящей функции внутрирудных даек долеритов. Вместе с тем фиксируемый во внутрирудных дайках-флюидопроводниках долеритов калиево-сернисто-углекислотный профиль метасоматизма [9] унаследован процессом околорудного метасоматизма, но с образованием в берези-

тах, в отличие от аподолеритовых метасоматитов, относительно низкотемпературного серицита, а не биотита, вследствие дальнейшего при фильтрации охлаждения растворов и при отсутствии, вероятно, по этой же причине, в средне-низкотемпературных березитах метасоматической обыкновенной роговой обманки. В сочетании с феофильной (Mg , Fe , Ti , P) специализацией внутридайковых биотит-роговообманковых и околорудных в обрамлении глубинных разломов метасоматитов (березитов) [8, 9] эти факты квалифицируют внутрирудные дайки-флюидопроводники долеритов как связующее звено между базитовыми очагами мантии – источниками базитовых расплавов и золотоносных растворов и образованными этими растворами на верхних горизонтах земной коры мезотермальными месторождениями золота.

Приведенные данные дополняют изотопные отношения участвующих в составе руд элементов. Обращается внимание на аномальное облегчение серы сульфидов в рудных залежах Сухого Лога, обусловленное привнесом металлоносными растворами изотопно легкой мантийной серы [13]. Участие в образовании руд месторождения Сухой Лог флюидов и металлов, генерированных в мантии, доказывается также расширенными интервалами значений изотопных отношений восстановленных и окисленных форм углерода ($^{13}\text{C} = -30 \dots -3,5 \text{ ‰}$, $^{18}\text{O} = 16,3 \dots 30,2 \text{ ‰}$), серы и радиогенных изотопов TR [10], отвечающими мантии изотопными отношениями углерода карбонатов-порфиروبластов руд [50]. Согласно одной из последних версий рудообразования [11], наиболее мощные и наиболее золотоносные залежи жильно-прожилково-вкрапленных руд в месторождениях «сухоложского типа», образованные на конседиментационном, метаморфизованные на коллизионном этапах в областях раствороподводящих каналов вблизи единых центров повышенной эндогенной активности – разломов фундамента и узлов их пересечения, содержат сульфиды с высокой изотопной гомогенностью серы ($^{34}\text{S} = \pm 3 \text{ ‰}$), отвечающей метеоритному стандарту.

Извлеченные из месторождения Сухой Лог, месторождений Ленского и других [41] золоторудных районов, образующие согласованный ансамбль, взаимно дополняющие один другой факты составляют основу двух геолого-генетических сценариев, следуя которым природа создает в черносланцевом и кристаллическом субстрате золотосодержащие колчеданные и золоторудные месторождения.

Оба сценария активированы одним явлением-процессом – внедрением в мантию и земную кору по зонам сверхглубинной проницаемости, вероятно, из жидкого ядра планеты высокотемпературных газовых флюидов-теплоносителей, плавающих на своем пути мантию и земную кору – создающих «горячие точки». В мантии и коре возникают сосуществующие бассейны – очаги соответственно базитового и гранитного составов с последующим ох-

лаждением и кристаллизацией в опережающем по меркам геологического времени режиме коровых гранитных расплавов в относительно холодном сравнительно с мантией коровом субстрате.

Накапливающиеся в процессе кристаллизации в нижних частях магматических камер остаточные гранитные расплавы в случае их геохимической (металлогенической) специализации на литофильные, сидерофильные (Be, Li, Ta, Nb, Rb, Cs, Sn и др.) металлы в разных сочетаниях в благоприятных термодинамических и физико-химических условиях способны создавать редкометалльные пегматиты, генерировать металлонесные растворы, образующие редкометалльные месторождения. В результате кристаллизации гранитных расплавов образуются массивы, плутоны, батолиты палингенных гранитоидов – ранние составляющие антидромных флюидно-рудно-магматических комплексов.

Мантийные базитовые очаги продолжают функционировать, доказательством чему служат дайки долеритов, умеренно-щелочных долеритов, лейкодолеритов с нормативными для них минерало-химическими составами [9, 39–43], локализованные, в том числе, среди гранитоидов. В свою очередь, отсутствие в золоторудных месторождениях дорудных минглинг-даек – «гибридных» даек – факты, которые служат доказательством кристаллизации гранитных расплавов во всем объеме магматической камеры, включая остаточные расплавы в ее низах, до инъекции ранней порции базитовых расплавов и следующей за ней ранней порции золотонесных растворов. Очевидно, вследствие этого смешение поднимающихся из мантийных очагов базитовых расплавов с гранитными исключено, а золотонесные растворы не могут быть генерированы в уже не существующих остаточных гранитных расплавах. Они могут быть генерированы в продолжающих функционировать эманационно активных базитовых очагах мантии. Генерация золотонесных растворов и аккумуляция их наряду с разломами еще горячими внутрирудными базитовыми дайками-флюидопроводниками через промежутки времени, в течение которого дайки не успевают остыть, сочетаются с наследующей фемической специализацией базитовых расплавов фемической специализацией золотонесных растворов и мантийными соотношениями изотопов углерода карбонатов и серы сульфидов руд и околорудных (рудовмещающих) метасоматитов.

Описанный сценарий процесса генерации золотонесных растворов без участия метаморфизма сменяется двумя возможными геолого-генетическими сценариями образования без участия метаморфизма месторождений золота.

Первый предполагает инъекцию золотонесных растворов в земную кору океанического типа – в приконтинентальных областях океанов – зонах Бенъофа, в срединно-океанических хребтах, в структурах типа Восточно-Тихоокеанского поднятия, в рифтах – Красноморском фрагменте Восточ-

но-Африканского рифта, в трансформных разломах. Здесь образуются гидротермально-осадочные типа «куроко» месторождения, сочетающие в себе рудные тела грибообразной формы, – сложенные, как правило, колчеданами осадочные залежи – «шляпы» и гидротермально-метасоматическими прожилково-вкрапленными рудами «ножки грибов» в раствороподводящих разломах дна водоемов. В случаях активных донных течений стратиформные называемые вулканогенно-осадочными рудные залежи пространственно разобщены с субвертикальными гидротермально-метасоматическими телами, образованными в раствороподводящих разломах дна. Естественно, стратиформные залежи осадочных руд, в отличие от Сухого Лога, не должны содержать признаки околорудного метасоматизма при том, что распределение сопровождающих руды элементов определяется гидродинамическими режимами придонных вод, но не может подчиняться минералого-петрохимической зональности не существующих околорудных метасоматических ореолов.

Согласно второму сценарию, предполагающему инъекцию золотонесных растворов в земную кору континентального типа, на рубежах встречи холодных грунтовых вод – термодинамических и физико-химических барьерах с поднимающимися горячими золотонесными растворами – образуются гидротермально-метасоматические и/или кварцево-жильные мезотермальные руды золота в сопровождении околорудных (рудовмещающих) метасоматических ореолов – зональных колонок, в том числе пропилит-березитового минералого-петрохимического профиля, и геохимических ореолов, структура которых подчиняется околорудной минералого-петрохимической зональности, как это фиксируется в месторождении Сухой Лог и множестве мезотермальных месторождений золота, образованных в кристаллическом и черносланцевом субстрате (табл. 1–4) [41].

Вероятно существование термодинамических и физико-химических барьеров и в верхних горизонтах океанической коры вследствие проникновения океанических (морских) вод на некоторую глубину в породы дна. В случае подъема здесь горячих металлонесных растворов возможно отложение рудной минерализации на барьерах, то есть под дном, и образование не осадочных залежей, а пологих вдоль барьеров, гидротермально-метасоматических залежей прожилково-вкрапленных руд, подобных Главной и другим залежам Сухого Лога.

Заключение

Как отмечалось [8, 9], в ученом сообществе, занятом проблемами рудной геологии, существуют обусловленные субъективными причинами – человеческим фактором – негативные явления, продуцирующие не живительную для развития науки дискуссию, а суррогат ее, искусственно навязываемый посредством вброса в научный оборот недо-стоверных «фактов» или исключения из учета,

анализа, обсуждения, обобщения опубликованных в не самых непопулярных изданиях вполне достоверных фактов, очевидно, по причинам, далеким от поисков истины. Наиболее популярные негативные явления заключаются в следующем.

- Вброс в научный оборот статистически не выверенного «факта» о приуроченности гидротермальных месторождений золота к породам, обогащенным металлом, инициировал более полувека назад, несмотря на предшествующий опыт отказа от литораль-секреционной гипотезы, возникновение метаморфогенно-гидротермальной гипотезы, популярной в разных версиях до сих пор при том, что этот «факт» был вскоре повторно опровергнут по причине признания, в том числе автором вброса В.А. Буряком, одинаково низких (2...4 мг/т) содержаний золота в черных сланцах золотоносных и не золотоносных районов.
- Отрицание с методически ущербными попытками обоснования одновременно с презентацией метаморфогенно-гидротермальной гипотезы участия описанных С.Д. Шером [1] метасоматитов беззитовой формации в составе околорудно измененных пород (черных сланцев) Ленского района.
- Отрицание без обоснования в новейшее время в Сухом Логу и месторождениях золота «сухоложского типа» околорудных метасоматических и геохимических ореолов, описанных предшественниками-профессионалами [2–4, 7, 10, 12, 51], породившее новую для Ленского района экзгальационно-осадочную гипотезу рудообразования и как бы способствующее поддержанию ее в конкурентоспособном состоянии, но не отвечающее реальной ситуации.
- Исключение апологетами метаморфогенно-гидротермальной и гранитогенной гипотез из учета, анализа, обсуждения, обобщения ассоциации феофильных элементов в составе Mg, Fe, Ti, P, образующих в околорудных метасоматических ореолах мезотермальных месторожде-

ний золота, в том числе апочерносланцевых, в том числе в Сухом Логу, контрастные аномалии, наследующие феофильную специализацию аподолеритовых метасоматитов, образованных золотоносными растворами во внутрирудных дайках-флюидопроводниках долеритов.

- Исключение апологетами обеих гипотез из учета, анализа, обсуждения, обобщения базитовых даек, образованных в мезотермальных месторождениях одновременно с рудами посредством чередования во времени инъекций базитовых расплавов и золотоносных растворов, – даек-флюидопроводников, которые в сочетании с минералого-петрохимическим и геохимическим содержанием внутридайковых метасоматитов, изотопными отношениями углерода карбонатов и серы сульфидов руд и околорудных метасоматитов служат индикаторами генерации металлоносных растворов в базитовых очагах мантии, в сочетании с контролем базитовых даек и мезотермальных месторождений золота глубинными разломами – связующим звеном между базитовыми очагами мантии и месторождениями в верхних горизонтах земной коры.

Возврат, включение в научный оборот всех накопленных достоверных, проверяемых, повторяющихся во множестве мезотермальных месторождений золота, образованных в разнообразном кристаллическом и черносланцевом субстрате, фактов, как это следует из приведенных материалов, обеспечивает обоснование представления о геолого-генетической однородности месторождений той и другой совокупности как магматогенно-гидротермальных и концепции, наиболее приближенной к написанному и реализованному природой сценарию, содержание которого доказывается результатами реконструкции рудообразующих процессов на основе изучения всех оставленных ими, в том числе неудобных для многих, вещественных следов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шер С.Д. Околорудные изменения, сопутствующие золото-кварцевым жилам в Ленском золотоносном районе // Метасоматические изменения боковых пород и их роль в рудообразовании. – М.: Недра, 1966. – С. 282–291.
2. Коновалов И.В. Околорудная зональность одного золоторудного месторождения (Ленский район) // Геология и геофизика. – 1973. – № 1. – С. 123–125.
3. Шмотов А.П. Тектонические деформации и сопряженные с ними гидротермально-метасоматические преобразования вмещающих пород (Ленский золотоносный район) // Доклады АН СССР. – 1974. – Т. 218. – № 1. – С. 178–181.
4. Шаров В.Н., Шмотов А.П., Коновалов И.В. Метасоматическая зональность и связь с ней оруденения. – Новосибирск: Наука, 1978. – 103 с.
5. Буряк В.А., Летников Ф.А. О роли процессов регионального метаморфизма и ультраметаморфизма в развитии золотого оруденения // Вопросы геологии месторождений золота. – Томск: Изд-во Томского университета, 1970. – С. 19–24.
6. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
7. Русинов В.Л., Русинова О.В., Кряжев С.Г. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50. – № 1. – С. 3–46.
8. Кучеренко И.В. Проблемы рудной геологии и человеческий фактор. Часть 1. Минералого-петрохимическая зональность околосланцевых метасоматических ореолов в мезотермальных месторождениях золота: теория, эксперимент, природа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 105–118.
9. Кучеренко И.В. Проблемы рудной геологии и человеческий фактор. Часть 2. Магматизм и мезотермальное рудообразование // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 6. – С. 148–170.
10. Рудообразующая система золото-платинового месторождения Сухой Лог / Н.П. Лаверов, В.В. Дистлер, Ю.Г. Сафонов,

- И.В. Чернышов, М.А. Юдовская, Г.Л. Митрофанов, В.К. Немеров // Металлогения, нефтегазоносность и геодинамика Северо-Азиатского кратона и орогенных поясов его обрамления: Материалы II Всероссийского металлогенического совещания. – Иркутск, 25–28 августа 1998 г. – Иркутск: ООО «Сан-тай», 1998. – С. 296.
11. Кряжев С.Г. Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах: автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. – М., 2017. – 52 с.
12. Новые данные об условиях рудоотложения и составе рудообразующих флюидов золото-платинового месторождения Сухой Лог / Н.П. Лаверов, В.Ю. Прокофьев, В.В. Дистлер, М.А. Юдовская, А.М. Спиридонов, В.И. Гребенщикова, Н.Л. Матиль // Доклады РАН. – 2000. – Т. 371. – № 1. – С. 88–92.
13. Формы нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия) / В.В. Дистлер, Г.Л. Митрофанов, В.К. Немеров, В.А. Коваленкер, А.В. Мохов, Л.К. Семейкина, М.А. Юдовская // Геология рудных месторождений. – 1996. – Т. 38. – № 6. – С. 467–484.
14. Маракушев А.А., Русинов В.Л. Природа золотоносности углеродистых толщ // Доклады РАН. – 2005. – Т. 401. – № 4. – С. 515–520.
15. Состав метасоматических минералов золоторудного месторождения Сухой Лог как критерий его генетической связи с базит-гипербазитовым магматизмом / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Е. Борисовский, Е.И. Алышева // Доклады РАН. – 2005. – Т. 405. – № 5. – С. 661–665.
16. Озерова Н.А. Руть и эндогенное рудообразование. – М.: Наука, 1986. – 155 с.
17. Степанов В.А., Моисеенко В.Г. Геология золота, серебра и ртути. – Владивосток: Дальнаука, 1993. – 228 с.
18. Уникальная ассоциация природной амальгамы золота, кинвари, самородных металлов и карбидов Фадеевского рудно-рассыпного узла, Приморье / В.П. Молчанов, А.И. Ханчук, Е.И. Медведев, Л.П. Плюснина // Доклады РАН. – 2008. – Т. 422. – № 4. – С. 536–538.
19. Evidence of local sourcing of sulphur and gold in an Archaean sediment-hosted gold deposit / Vikraman Selvaraja, M.L. Fiorentini, Heejin Jeon, D.D. Savard, C.K. Laflamme, P. Guagliardo, S. Caruso, Thi-Hao Bui // Ore Geology Reviews. – 2017. – V. 89. – P. 909–930.
20. Multiple mineralization events in the Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag deposit and their relationship with the geodynamic evolution in the North Himalayan Metallogenic Belt, South Tibet / D. Wang, Y. Sheng, R. Mathur, J. Jiang, S. Shang, J. Sheng, M. Yu // Ore Geology Reviews. – 2019. – V. 105. – P. 201–215.
21. Khanchuk A.I., Plyusnina L.P., Nikitenko E.M. The Noble Metals Distribution in the black shales of the Degdekan Gold deposit in Northeast Russia // Russian journal of Pacific Geology. – 2011. – V. 5. – № 2. – P. 89–96.
22. Vasilyeva I.E., Shabanova E.V., Razvozaeva E.A. Noble metals in the insoluble carbonaceous substance of black shales and ores: Direct atomic emission data // Geochemistry International. – 2012. – V. 50. – № 9. – P. 771–776.
23. Relationship between metamorphism and ore formation at the Sukhoi Log gold deposit hosted in black slates from the data of U-Th-Pb isotopic SHRIMP-dating of accessory minerals / M.A. Yudovskaya, V.V. Distler, N.V. Rodionov, A.V. Mokhov, A.V. Antonov, S.A. Sergeev // Geology of ore deposits. – 2011. – V. 53. – Iss. 1. – P. 27–57.
24. P-T-X conditions on the genesis of orogenic Au (As, Bi, Ag) deposit in metasedimentary rocks of the Buracao Area, Arai Group, Brasilia Fold Belt, Brasil / G.L.C. Pires, C. Renac, E.M. Bongioio, R. Neumann, A. Barats // Ore Geology Reviews. – 2019. – V. 105. – P. 163–182.
25. Noble metals in black shales of the Sukhoi Log gold deposit (East Siberia): evidence from scintillation arc atomic-emission spectrometry / I.E. Vasil'eva, E.V. Shabanova, E.M. Goryacheva, O.T. Sotskaya, V.A. Labusov, A.A. Dzyuba, O.A. Nekludov // Russian Geology and Geophysics. – 2018. – V. 59. – № 8. – P. 997–1009.
26. The gold ore deposit Bakyrchik and views on the formation of the mineral deposits in black shale strata / Z. Umarbekova, R. Seltmann, K. Dyussebaeva, M. Kokkuzova // Proceedings of the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. – 2017. – V. 17. – Iss. 11. – P. 1111–1118. DOI: 10.5593/sgem2017/11/S04.142 (www.sgem.org.)
27. A black shale protolith for gold-tellurium mineralization in the Dalradian Supergroup (Neoproterozoic) of Britain and Ireland / J. Parnell, M. Perez, J. Armstrong, L. Bullock, J. Feldmann and A.J. Boyce // Applied Earth Science. – 2017. – V. 126. – № 4. – P. 161–175. URL: <https://doi.org/10.1080/03717453.2017.1404682> (дата обращения: 20.04.2019).
28. Augustin J., Gaboury D. Multi-stage and multi-sourced fluid and gold in the formation of orogenic gold deposits in the world-class Mana district of Burkina Faso-Revealed by LA-ICP-MS analysis of pyrites and arsenopyrites // Ore Geology Reviews. – 2019. – V. 104. – P. 495–521.
29. Damdinov B.B., Damdinova L.B. Zun-Ospa gold deposit, Eastern Sayan: Geology, ore composition and genesis // Geology of ore deposits. – 2018. – V. 60. – Iss. 3. – P. 241–264.
30. Nature and source of the ore-forming fluids associated with orogenic gold deposits in the Dharwar craton / B. Mishra, K.L. Pruseth, P. Nazarika, S.S. Chinnasamy // Geoscience Frontiers. – 2018. – V. 9. – Iss. 3. – P. 715–726.
31. Formation of epizonal gold mineralization within the Latimojong metamorphic complex, Sulawesi, Indonesia: Evidence from mineralogy, fluid inclusions and Raman spectroscopy / A.Y.A. Hakim, F. Melcher, W. Prochaska, R. Bakker, G. Rantitsch // Ore Geology reviews. – 2018. – V. 97. – P. 88–108.
32. Kondrat'eva L.A., Anisimova G.S., Zaitsev A.I. The Zaderzhninskoe gold deposit: mineral composition, fluid inclusions and age (South Verkhoyansk region) // Russian Geology and Geophysics. – 2018. – V. 59. – Iss. 10. – P. 1288–1300.
33. Local and regional mass transfer during trusting, veining and boudinage in the genesis of the giant shale-hosted Paracatu gold deposit, Minas Gerais, Brazil / N.H.S. Oliver, B. Thomson, F.H. Freitas-Silva, R.J. Holcombe, B. Rusk, B.S. Almeida, K. Faure, G.R. Davidson, E.L. Esper, P.J. Guimaraes, M.A. Darrenne // Economic Geology. – 2015. – V. 110. – Iss. 7. – P. 1803–1834.
34. Chemical evolution of pyrite at the Kopylovsky and Kavkaz black shale-hosted gold deposits, Bodaybo district, Russia: Evidence from EPMA and La-ICP-MS data / E.E. Palenova, E.V. Belogub, O.Y. Plotinskaya, K.A. Novoselov, V.V. Maslennikov, V.A. Kotlyarov, I.A. Blinov, A.A. Kuzmenko, I.G. Griboedova // Geology of ore deposits. – 2015. – V. 57. – Iss. 1. – P. 64–84.
35. Gold concentrations in metamorphic fluids: a LA-ICP-MS study of fluid inclusions from the Alpine orogenic belt / K. Rauchenstein-Martinek, T. Wagner, M. Walle, C.A. Heinrich // Chemical Geology. – 2014. – V. 385. – P. 70–83.
36. Age, origin and significance of nodular sulfides in 2680 Ma carbonaceous black shale of the Eastern Goldfields Superterrane, Yilgarn Craton, Western Australia / J.A. Steadman, R.R. Large, S. Meffre, S.W. Bull // Precambrian Research. – 2013. – V. 230. – P. 227–247.
37. Large R.R., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for carlin-type and orogenic gold deposits // Economic Geology. – 2011. – V. 106. – Iss. 3. P. 331–358.
38. Этапы формирования крупномасштабной благороднометалльной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Си-

- бирь): результаты изотопно-геохронологического изучения / Н.П. Лавров, И.В. Чернышов, А.В. Чугаев, Э.Д. Баирова, Ю.В. Гольцман, В.В. Дистлер, М.А. Юдовская // Доклады РАН. – 2007. – Т. 415. – № 2. – С. 236–241.
39. Кучеренко И.В., Грибанов А.П. Взаимоотношения дайковых образований с золоторудными кварцевыми жилами в Бериккульском рудном поле // Известия Томского политехнического института. – 1968. – Т. 134. – С. 153–158.
40. 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.
41. Кучеренко И.В. Металлогения золота: приложение к мезотермальным месторождениям, образованным в несланцевом и черносланцевом субстрате горно-складчатых сооружений Южной Сибири // Современные проблемы геологии и разведки полезных ископаемых: Материалы Международной конф., посвящ. 80-летию основания в Томском политехническом университете первой в азиатской части России кафедры «Разведочное дело». – Томск, 5–8 октября 2010 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 241–256.
42. Кучеренко И.В. Петрология гидротермального метасоматизма долеритов внутрирудных даек мезотермальных месторождений золота. Часть 1. Кедровское месторождение (Северное Забайкалье) // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 1. – С. 155–165.
43. Кучеренко И.В. Петрология гидротермального метасоматизма долеритов внутрирудных даек мезотермальных месторождений золота. Часть 2. Месторождение Зун-Холба (Восточный Саян) // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 73–86.
44. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района / И.К. Рундквист, В.А. Бобров, Т.Н. Смирнова, М.Ю. Смирнов, М.Ю. Данилова, А.А. Ащеулов // Геология рудных месторождений. – 1992. – Т. 34. – № 6. – С. 3–15.
45. Шер С.Д. Жильные изверженные породы основного состава в бассейне р. Бодайбо и их соотношения с кварцевыми жилами // Труды Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института. – 1959. – Вып. 4. – С. 104–114.
46. Кондратенко А.К., Шер С.Д. Метасоматические изменения жильных пород в Ленской золотоносной области и их поисковое значение с точки зрения золотоносности // Вопросы геологии месторождений золота и золотоносных районов. – М.: ЦНИГРИ, 1968. – С. 312–314.
47. Синцов А.В. Роль Кадали-Сухоложского разлома в размещении золотого оруденения (Ленский золотоносный район) // Доклады АН СССР. – 1974. – Т. 218. – № 4. – С. 916–918.
48. Поспелов Г.Л. Геологические предпосылки к физике рудоконтролирующих флюидопроводников // Геология и геофизика. – 1963. – № 3. – С. 18–19.
49. Рундквист Д.В. О влиянии распределения температур горных пород на процессы метасоматического гидротермального минералообразования // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1966. – Ч. 95. – Вып. 5. – С. 509–525.
50. Гаврилов А.М., Кряжев С.Г. Минералого-геохимические особенности руд месторождения Сухой Лог // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 8. – С. 3–16.
51. Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в золоторудном месторождении Сухой Лог (Ленский район). Ч. 2. Петрология околорудного метасоматизма / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхоzin // Известия Томского политехнического университета. Науки о земле. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 28–37.

Поступила 29.04.2019 г.

Информация об авторах

Кучеренко И.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

UDC 553.3/.4.06:551.25:553.2:167–047.58

ORE GEOLOGY PROBLEMS AND THE HUMAN FACTOR. PART 4. METAMORPHISM AND MESOTHERMAL OREFORMATION

Igor V. Kucherenko,

kivr@tpu.ru

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

The relevance of the research. The conditions of the known large mesothermal gold deposits formation into black shales states of different age form the subject of animated discussion which often acquires the signs of substitute and probably therefore the endless one as a result of exception by concrete author or author's group of the facts important for the problem solution but which don't fit in database of developing by him/them ideas, from the consideration, discussion, generalization.

The main aim of the research. To obtain the correct results required for deepening the hydrothermal ore formation theory and developing, improving the effective forecast-search criteria of the deposits it is necessary to remove this negative manifestation of the human factor and return the discussion in normal course by means of including in scientific expression of «handy» and «non handy» facts in reconstruction of ore formation.

The methods of the research. The author has analyzed the database proposed long ago and recently for substantiation of the metamorphic-hydrothermal and others hypotheses of mesothermal gold deposits formation into black shales strates. The paper introduces the author's materials, including the analytic data – the results of the full chemical silicate analysis (wet) of rocks, atomic-absorption analysis of the content of gold, silver, mercury into rocks, petrochemical balance calculations of the between-zoning migration of chemical elements into near-ore metasomatic haloes, mathematical computing of the analyses results (content oreogenous elements).

The results of the research. The author made the conclusion on geology-genetic uniformity of mesothermal gold deposits formed into crystalline substratum and black shales. The following facts: 1) control of gold deposits by deep faults; 2) similar geologic age of early plutons, massifs of palaeogenetic granitoids with large accompanying dikes of average-soured rocks and late dikes of the moderately-alkaline dolerites, dolerites, leucodolerites of tillore, insideore, afterore generations, including transformed into hightemperature biotite-amphibole hornblende metasomatites of insideore dikes-fluidconductors, and ores; 3) authentic mineral-petrochemical zoning of the near-ore metasomatic haloes in both substratum, formed in conditions of potassium-sulphurously-carbon-dioxidic metasomatism of propylite-beresitic type with entrance into haloes of potassium, restoring sulphur, carbon dioxide, removal of sodium and partly silicon; 4) inheritance by the nearore metasomatites of the petrochemical type insideoleritic metasomatism and contrasting anomalies of the femic (Mg, Fe, P, Ti) elements; 5) isotopic relations of sulphides sulphur and carbonates carbon of ores and nearore metasomatites meeting the meteoritic standard (the mantle), prove the conclusion. The enumerated facts eliminate the participation of metamorphism in ore formation.

In Lensk region, as well as in others goldore regions of mountain-folded Siberian craton frame, mesothermal gold deposits are formed into antidiromic granite-diorite-dolerite fluid-ore-magmatic complexes composition at late basic stage of their function, and insideore dikes-fluid conductors of moderately-alkaline dolerites are the link between basic hearthes of mantle – the sources of gold-bearing solutions, and deposits in the crust.

Paper structure. The 3rd part of the paper has the following sections: subject of the problems and the formulation of the task; mineral-petrochemical zoning of the nearore propylite-beresitic type metasomatic haloes in mesothermal gold deposits formed into crystalline substratum and black shales series; mineral-petrochemical zoning of the gold deposit Sukhoi Log nearore metasomatic haloe. In the 4th part of the paper there are the following sections: the distribution of oreogenous elements into nearore expanse of the mesothermal gold deposits formed into crystalline substratum and black shales series; the discussion of the results and conclusion.

Key words:

Mesothermal gold deposits, crystalline substratum, black shales, magmatism, metamorphism, ore formation, human factor.

REFERENCES

1. Sher S.D. Okolorudnye izmeneniya, soputstvuyushchie zoloto-kvarцевым жилам в Ленском золотосносном районе [Near-ore changings accompanying to gold-quartz veins in Lenskii auriferous]. *Metasomaticheskie izmeneniya bokovykh porod i ikh rol v rudoobrazovanii* [Metasomatic alterations of the lateral rocks and their lines in ore formation]. Moscow, Nedra Publ., 1966. pp. 282–291.
2. Kononov I.V. Okolorudnaya zonalnost odnogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Lenskii rayon) [Near-ore zoning of one gold-ore deposit (Lenskii region)]. *Geologiya i geofizika*, 1973, no. 1, pp. 123–125.
3. Shmotov A.P. Tektonicheskie deformatsii i sopryazhennyye s nimi gidrotermalno-metasomaticheskie preobrazovaniya vmeshchayushchikh porod (Lenskii zolotonosny rayon) [Tectonic deformations and related to them hydrothermal metasomatic alterations of the containing rocks (Lenskii auriferous region)]. *Papers of AC SSSR*, 1974, vol. 218, no. 1, pp. 178–181.
4. Sharov V.N., Shmotov A.P., Kononov I.V. *Metasomaticheskaya zonalnost i svyaz s ney orudeneniya* [Metasomatic zoning and mineralization related to it]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1978. 103 p.
5. Buryak V.A., Letnikov F.A. O roli protsessov regionalnogo metamorfizma i ultrametamorfizma v razviti zolotogo orudeneniya [On the influence of regional metamorphism and ultrametamorphism in ore-grade gold mineralization]. *Voprosy geologii mestorozhdeniy zolota* [The problems of the gold deposits geology]. Tomsk, Tomsk University Publ., 1970. pp. 19–24.
6. Buryak V.A. *Metamorfizm i rudoobrazovanie* [Metamorphism and ore-formation]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 256 p.
7. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G. Okolorudnyy metasomatizm terrigennykh ugleorodistyykh porod v Lenском zolotorudnom rayone [Near ore metasomatism of the terrigenous carbonaceous rocks in Lenskii auriferous region]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 3–46. In Rus.
8. Kucherenko I.V. Ore geology problems and the human factor. Part 1. Mineral-petrochemical zoning of the near-veins metasoma-

- tic 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.
9. Kucherenko I.V. Ore geology problems and the human factor. Part 2. Magmatism and mesothermal ore-formation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 6, pp. 148–170. In Rus.
 10. Laverov N.P., Distler V.V., Safonov Yu.G., Chernyshov I.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K. Rudoobrazuyushchaya sistema zoloto-platinovogo mestorozhdeniya Sukhoi Log [Ore-forming system of the gold-platinum deposit Sukhoi Log]. *Metallogeniya, neftegazonosnost i geodinamika Severo-Aziatskogo kratona i orogennykh pojasov ego obramleniya. Materialy II Vserossiyskogo metallogenicheskogo soveshchaniya* [Metallogeny, oil-gas-containing and geodynamics of North-Asian craton and orogenic belts it frame. Materials of II Allrussian Metallogenic conference]. Irkutsk, 25–28 August 1998. pp. 296.
 11. Kryazhev S.G. *Geneticheskie modeli i kriterii prognoza zolotorudnykh mestorozhdeniy v uglerodisto-terrigennykh kompleksakh*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [The genetic models and forecast criteria of the gold-ore deposits into carbonaceous-terrigeneous complexes. Dr. Diss. Abstract]. Moscow, 2017. 52 p.
 12. Laverov N.P., Prokofev V.Yu., Distler V.V., Yudovskaya M.A., Spiridonov A.M., Grebenshchikova V.I., Matel N.L. Novye dannye ob usloviyakh rudootlozheniya i sostave rudoobrazuyushchikh flyuidov zoloto-platinovogo mestorozhdeniya Sukhoi Log [New data on the conditions of ore-formation and ore-forming fluids composition of Sukhoi Log gold-platinum deposit]. *Papers of RAC*, 2000, vol. 371, no. 1, pp. 88–92. In Rus.
 13. Distler V.V., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K., Kovalenker V.A., Mokhov A.V., Semykina L.K., Yudovskaya M.A. Formy nakhozhdeniya metallov platinovoy gruppy i ikh genezis v zolotorudnom mestorozhdenii Sukhoi Log (Rossiya) [Forms of participation of the platinum group metals and their genesis in gold-ore deposit Sukhoi Log (Russia)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1996, vol. 38, no. 6, pp. 467–484.
 14. Marakushev A.A., Rusinov V.L. Nature of the gold-bearing of the carbonaceous series. *Papers of RAC*, 2005, vol. 401, no. 4, pp. 515–520. In Rus.
 15. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Borisovskiy S.E., Alysheva E.I. The composition of the Sukhoi Log gold-ore deposit metasomatic minerals as criterion of the genetic connection with subsilicic-ultrabasic magmatism. *Papers of RAC*, 2005, vol. 405, no. 5, pp. 661–665. In Rus.
 16. Ozerova N.A. *Rtut i endogennoe rudoobrazovanie* [Mercury and endogenous ore formation]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 155 p.
 17. Stepanov V.A., Moiseenko V.G. *Geologiya zolota, srebra i rtuti* [Mercury and endogenous ore formation]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1993. 228 p.
 18. Molchanov V.P., Khanchuk A.I., Medvedev E.I., Plyusnina L.P. Unique association of natural amalgam gold, cinnabar, native metals and carbides of Fadeevskoi ore-deposit knot, Seaside. *Papers of RAC*, 2008, vol. 422, no. 4, pp. 536–538. In Rus.
 19. Selvaraja Vikraman, Fiorentini M.L., Jeon Heejin, Savard D.D., Laflamme C.K., Guagliardo P., Caruso S., Bui Thi-Hao. Evidence of local sourcing of sulphur and gold in an Archaean sediment-hosted gold deposit. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 89, pp. 909–930.
 20. Wang D., Sheng Y., Mathur R., Jiang J., Shang S., Sheng J., Yu M. Multiple mineralization events in the Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag deposit and their relationship with the geodynamic evolution in the North Himalayan Metallogenic Belt, South Tibet. *Ore geology Reviews*, 2019, vol. 105, pp. 201–215.
 21. Khanchuk A.I., Plyusnina L.P., Nikitenko E.M. The Noble Metal Distribution in the black shales of the Degdekan Gold deposit in Northeast Russia. *Russian journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 2, pp. 89–96.
 22. Vasilyeva I.E., Shabanova E.V., Razvozzaeva E.A. Noble metals in the insoluble carbonaceous substance of black shales and ores: Direct atomic emission data. *Geochemistry International*, 2012, vol. 50, no. 9, pp. 771–776.
 23. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. Relationship between metamorphism and ore formation at the Sukhoi Log gold deposit hosted in black slates from the data of U-Th-Pb isotopic SHRIMP-dating of accessory minerals. *Geology of ore deposits*, 2011, vol. 53, Iss. 1, pp. 27–57.
 24. Pires G.L.C., Renac C., Bongioiolo E.M., Neumann R., Barats A. P-T-X conditions on the genesis of orogenic Au (As, Bi, Ag) deposit in metasedimentary rocks of the Buracao Area, Arai Group, Brasilia Fold Belt, Brasil. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 105, pp. 163–182.
 25. Vasileva I.E., Shabanova E.V., Goryacheva E.M., Sotskaya O.T., Labusov V.A., Dzyuba A.A., Nekudov O.A. Noble metals in black shales of the Sukhoi Log gold deposit (East Siberia): evidence from scintillation arc atomic-emission spectrometry. *Russian Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 8, pp. 997–1009.
 26. Umarbekova Z., Seltmann R., Dyussebaeva K., Kokkuzova M. The gold ore deposit Bakyrchic and views on the formation of the mineral deposits in black shale strata. *Proc. of the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 2017, vol. 17, iss. 11, pp. 1111–1118. DOI: 10.5593/sgem2017/11/S04.142 (www.sgem.org).
 27. Parnell J., Perez M., Armstrong J., Bullock L., Feldmann J., Boyce A.J. A black shale protolith for gold-tellurium mineralization in the Dalradian Supergroup (Neoproterozoic) of Britain and Ireland. *Applied Earth Science*, 2017, vol. 126, no. 4, pp. 161–175. Available at: <https://doi.org/10.1080/03717453.2017.1404682> (accessed 20 April 2019).
 28. Augustin J., Gaboury D. Multi-stage and multi-sourced fluid and gold in the formation of orogenic gold deposits in the world-class Mana district of Burkina Faso-Revealed by LA-ICP-MS analysis of pyrites and arsenopyrites. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 104, pp. 495–521.
 29. Damdinov B.B., Damdinova L.B. Zun-Ospa gold deposit, Eastern Sayan: Geology, ore composition and genesis. *Geology of ore deposits*, 2018, vol. 60, iss. 3, pp. 241–264.
 30. Mishra B., Pruseth K.L., Nazarika P., Chinnasamy S.S. Nature and source of the ore-forming fluids associated with orogenic gold deposits in the Dharwar craton. *Geoscience Frontiers*, 2018, vol. 9, Iss. 3, pp. 715–726.
 31. Hakim A.Y.A., Melcher F., Prochaska W., Bakker R., Rantitsch G. Formation of epizonal gold mineralization within the Latimojong metamorphic complex, Sulawesi, Indonesia: Evidence from mineralogy, fluid inclusions and Raman spectroscopy. *Ore Geology reviews*, 2018, vol. 97, pp. 88–108.
 32. Kondratyeva L.A., Anisimova G.S., Zaitsev A.I. The Zaderzhninskoe gold deposit: mineral composition, fluid inclusions and age (South Verkhoyansk region). *Russian Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, Iss. 10, pp. 1288–1300.
 33. Oliver N.H.S., Thomson B., Freitas-Silva F.H., Holcombe R.J., Rusk B., Almeida B.S., Faure K., Davidson G.R., Esper E.L., Guimaraes P.J., Dardenne M.A. Local and regional mass transfer during trusting, veining and boudinage in the genesis of the giant shale-hosted Paracatu gold deposit, Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, Iss. 7, pp. 1803–1834.
 34. Palenova E.E., Belogub E.V., Plotinskaya O.Y., Novoselov K.A., Maslennikov V.V., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Kuzmenko A.A., Griboedova I.G. Chemical evolution of pyrite at the Kopylovsky and Kavkaz black shale-hosted gold deposits, Bodaybo district, Russia: Evidence from EPMA and LA-ICP-MS data. *Geology of ore deposits*, 2015, vol. 57, Iss. 1, pp. 64–84.
 35. Rauchenstein-Martinek K., Wagner T., Walle M., Heinrich C.A. Gold concentrations in metamorphic fluids: a LA-ICP-MS study

- of fluid inclusions from the Alpine orogenic belt. *Chemical Geology*, 2014, vol. 385, pp. 70–83.
36. Steadman J.A., Large R.R., Meffre S., Bull S.W. Age, origin and significance of nodular sulfides in 2680 Ma carbonaceous black shale of the Eastern Goldfields Superterrane, Yilgarn Craton, Western Australia. *Precambrian Research*, 2013, vol. 230, pp. 227–247.
 37. Large R.R., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for carbin-type and orogenic gold deposits. *Economic Geology*, 2011, vol. 106, Iss. 3, pp. 331–358.
 38. Laverov N.P., Chernyshov I.V., Chugaev A.V., Bairova E.D., Goltsman Yu.V., Distler V.V., Yudovskaya M.A. The stages of formation of the large-scale noble-metal mineralization into Sukhoi Log deposit (Eastern Siberia): isotope-geochronological study result. *Papers of RAC*, 2007, vol. 415, no. 2, pp. 236–241. In Rus.
 39. Kucherenko I.V., Gribanov A.P. Vzaimootnosheniya daykovykh obrazovaniy s zolotorudnymi kvartsevyimi zhilami v Berikul'skom rudnom pole [Interrelationships of dykes with gold-ore quartz veins in Bericul deposit]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1968, vol. 134, pp. 153–158.
 40. Kucherenko I.V. Prostranstvenno-vremennyye i petrokhimicheskie kriterii svyazi obrazovaniya zolotogo orudneniya s glubinyim magmatizmom [Spatially-temporary and petrochemic criteria of gold mineral formation relation to plutonic magmatism]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geologicheskaya*, 1990, no. 10, pp. 78–91.
 41. Kucherenko I.V. Metallogeniya zolota: prilozhenie k mezotermalnym mestorozhdeniyam, obrazovannym v neslantsevom i chernoslantsevom substrate gorno-skladchatykh sooruzheniy Yuzhnoy Sibiri [Metallogeny of gold: the supplement to mesothermal deposits formed into nonshales and black shales substratum of the mauntin-folded structures of Southern Siberia]. *Sovremennyye problemy geologii i razvedki poleznykh iskopaemykh: Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu osnovaniya v Tomskom politekhnicheskoy universitete pervoy v aziatskoy chasti Rossii kafedry «Razvedochnoe delo»* [Contemporary problems of geology and exploration minerals. Materials of International conference]. Tomsk, 5–8 October 2010. pp. 241–256.
 42. Kucherenko I.V. Petrology of hydrothermal metasomatism of intra-ore dolerite dikes of mesothermal gold deposits. Part 1. Kedrovskoe deposit (Northern Transbaikalye). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no 1, pp. 155–165. In Rus.
 43. Kucherenko I.V. Petrology of hydrothermal metasomatism of intra-ore dolerite dikes of mesothermal gold deposits. Part 2. Zun Kholba deposit (Eastern Sayan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 73–86. In Rus.
 44. Rundkvist I.K., Bobrov V.A., Smirnova T.N., Smirnov M.Yu., Danilova M.Yu., Ashheulov A.A. Etapy formirovaniya Bodaybinskogo zolotorudnogo rayona [The stages of Bodaibo gold-ore region formation]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1992, vol. 34, no. 6, pp. 3–15.
 45. Sher S.D. Zhilnye izverzhennyye porody osnovnogo sostava v basseynе r. Bodaybo i ikh sootnosheniya s kvartsevyimi zhilami [The vein igneous rock of the basic composition in river Bodaibo reservoir and their correlation with quartz vein]. *Trudy Tsentral'nogo nauchno-issledovatel'skogo geologorazvedochnogo instituta*, 1959, Iss. 4, pp. 104–114.
 46. Kondratenko A.K., Sher S.D. Metasomaticheskie izmeneniya zhilnykh porod v Lenskoy zolotonosnoy oblasti i ikh poiskovoe znachenie s točki zreniya zolotonosnosti [Metasomatic alterations of veins rocks in Lensky auriferous region and their search meaning with point of view of gold-bearing]. *Voprosy geologii mestorozhdeniy zolota i zolotonosnykh rayonov* [Issues of geology of the gold deposits and auriferous regions]. Moscow, CZNIGRI Publ., 1968. pp. 312–314.
 47. Sintsov A.V. Rol Kadali-Sukholozhskogo razloma v razmeshchenii zolotogo orudneniya (Lenskii zolotonosnyy rayon) [Part of Kadali-Sukhoi Log fault in gold mineralization localization (Lenskii gold-containing region)]. *Papers of AS SSSR*, 1974, vol. 218, no. 4, pp. 916–918.
 48. Pospelov G.L. Geologicheskie predposylki k fizike rudokontroli-ruyushchikh flyuidoprovodnikov [Geologic preconditions to physics of ore-controlling fluidostingers]. *Geologiya i geofizika*, 1963, no. 3, pp. 18–19.
 49. Rundkvist D.V. O vliyanií raspredeleniya temperatur gornykh porod na protsessy metasomaticheskogo gidrotermalnogo mineraloobrazovaniya [On the influence of rocks temperature distribution on metasomatic hydrothermal mineral formation]. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*, 1966, Ch. 95, Iss. 5, pp. 509–525.
 50. Gavrilov A.M., Kryazhev S.G. Mineral-geochemic ores peculiarities of the deposit Sukhoi Log. *Razvedka i okhrana nedr*, 2008, no. 8, pp. 3–16. In Rus.
 51. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Petrologic geochemic features of the near ore metasomatism in gold-ore deposit Sukhoi Log (Lenskii region). Part 2. Petrology of near-ore metasomatism. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 28–37. In Rus.

Received: 29 April 2019.

Information about the authors

Igor V. Kucherenko, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 665.63: 51.001.57

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ПРОИЗВОДСТВА БЕНЗОЛА ПРИ НЕЧЕТКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Оразбаев Батыр Бидайбекович¹,
batyr_o@mail.ru

Оспанов Ербол Амангазович¹,
78oea@mail.ru

Оразбаева Кульман Нахановна²,
kulman_o@mail.ru

Серимбетов Булат Абуталибович²,
sba_mmc@mail.ru

¹ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
Казахстан, 010008, г. Астана, ул. Пушкина, 11.

² Казахский университет экономики, финансов и международной торговли,
Казахстан, г. Астана, ул. Жубанова, 7.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью эффективного решения задач управления режимами работы химико-технологических систем, которые являются многокритериальными, характеризуются неопределенностью и нечеткостью исходной информации. Так как реальные химико-технологические системы на производстве являются многокритериальными и часто работают в условиях нечеткости исходной информации, формализация и эффективное решение таких задач в нечеткой среде является весьма важной и актуальной для науки и производства.

Цель: разработать метод построения математических моделей химико-технологических систем на основе доступной информации различного характера (теоретической, статистической, экспертной, нечеткой информации); получить постановку задачи многокритериальной оптимизации при управлении такими системами и разработать эвристический подход к ее решению. Также провести апробацию полученных результатов на практике для построения математических моделей химико-технологической системы производства бензола и управления режимами ее работы в нечеткой среде.

Объекты: сложные химико-технологические системы на примере технологической установки производства бензола, которые описываются вектором критериев и характеризуются нечеткостью исходной информации.

Методы: методы системного анализа и теорий нечетких множеств, методы математического моделирования и многокритериального выбора, экспериментально-статистические методы разработки математических моделей.

Результаты. Предложен метод разработки математических моделей химико-технологических систем на основе доступной информации различного характера, в том числе исходной нечеткой информации. Новые постановки задач управления химико-технологическими системами в условиях нечеткости исходной информации получены путем модификации различных схем компримиссов для работы в нечеткой среде. Задачи многокритериальной оптимизации при управлении технологической системой сведены к многокритериальным задачам нечеткого математического программирования и на основе модификации принципов максимина и Парето оптимальности разработан эвристический алгоритм решения сформулированной задачи оптимального управления. Эти результаты реализованы на практике при построении математических моделей основных агрегатов химико-технологической системы производства бензола и при постановке и решении задачи управления режимами работы этой системы в нечеткой среде. Анализ и сравнение полученных результатов позволяют сделать вывод об эффективности предложенного подхода к решению задач управления на основе моделей в условиях нечеткости исходной информации.

Ключевые слова:

Химико-технологическая система, математическое моделирование, нечеткая информация, принципы оптимальности, бензол, эвристический алгоритм, задачи управления режимами работы.

Введение

Одним из перспективных и эффективных подходов к оптимизации и управлению режимами работы сложных химико-технологических систем (ХТС) в условиях неопределенности, вызванной нечеткостью исходной информации, является подход, использующий экспертные методы [1–4] и методы нечетких множеств [5–10]. Технологические объекты нефтеперерабатывающих производств относятся к сложным ХТС, в которых протекают технологические процессы по переработке сырья и производства нефтепродуктов, часто функционируют при нечеткой информации. Поэтому для мно-

гокритериальной оптимизации при управлении режимами работы таких систем необходимо учесть вектора критериев и нечеткость исходной информации. Такие задачи, как правило, формализуются в виде многокритериальных задач, которые решаются на основе знаний и опыта специалистов-экспертов, лица, принимающего решения (ЛПР), и математических моделей объектов и протекающих в них процессов, построенных с учетом нечеткости исходной информации [11, 12]. Такой подход привел к появлению методов решения задач многокритериальной оптимизации при управлении системой в нечеткой среде, использующие методологию

системного анализа, знания и опыт ЛПР, его предпочтения при выборе решений [13–16].

С целью формализации и применения исходной нечеткой информации для построения математических моделей и управления ХТС можно успешно использовать методы экспертных оценок и теории нечетких множеств (ТНМ). Для успешного решения проблем моделирования и оптимизации при управлении режимами работы, векторной оптимизации параметров ХТС в условиях неопределенности, нечеткости необходимо разработать метод построения моделей на основе доступной информации различного характера, дальше развивать методы решения задач многокритериальной оптимизации при управлении режимами работы ХТС в нечеткой среде, которые являются актуальными задачами химической технологии, нефтепереработки и нефтехимии [17].

В качестве объекта исследования рассматривается ХТС производства бензола Атырауского нефтеперерабатывающего завода (НПЗ), для которой необходимо определить оптимальные значения режимных параметров, обеспечивающие эффектив-

ное управление режимами работы по вектору критериев при ограничениях, имеющих нечеткий характер. При этом основными задачами являются: разработка математических моделей основных агрегатов объекта исследования, постановка задачи многокритериальной оптимизации при управлении ХТС производства бензола в условиях неопределенности и разработка эвристического алгоритма ее решения [18].

Рассмотрим основные характеристики ХТС производства бензола как объекта управления. На рисунке приведена схема объекта управления и процесса управления ХТС производства бензола.

Входными и режимными параметрами объекта управления, которые влияют на его режимы работы, являются: объем сырья, т. е. реформата (x_1), и его качественные показатели: доля серы (x_4) и ароматических углеводородов (УВ) в составе сырья (x_5), а также температура (x_2) и давление в бензольной колонне (БК) (x_3). Эти параметры являются режимными параметрами, изменениями которых определяются оптимальные режимы работы ХТС производства бензола (рисунок).

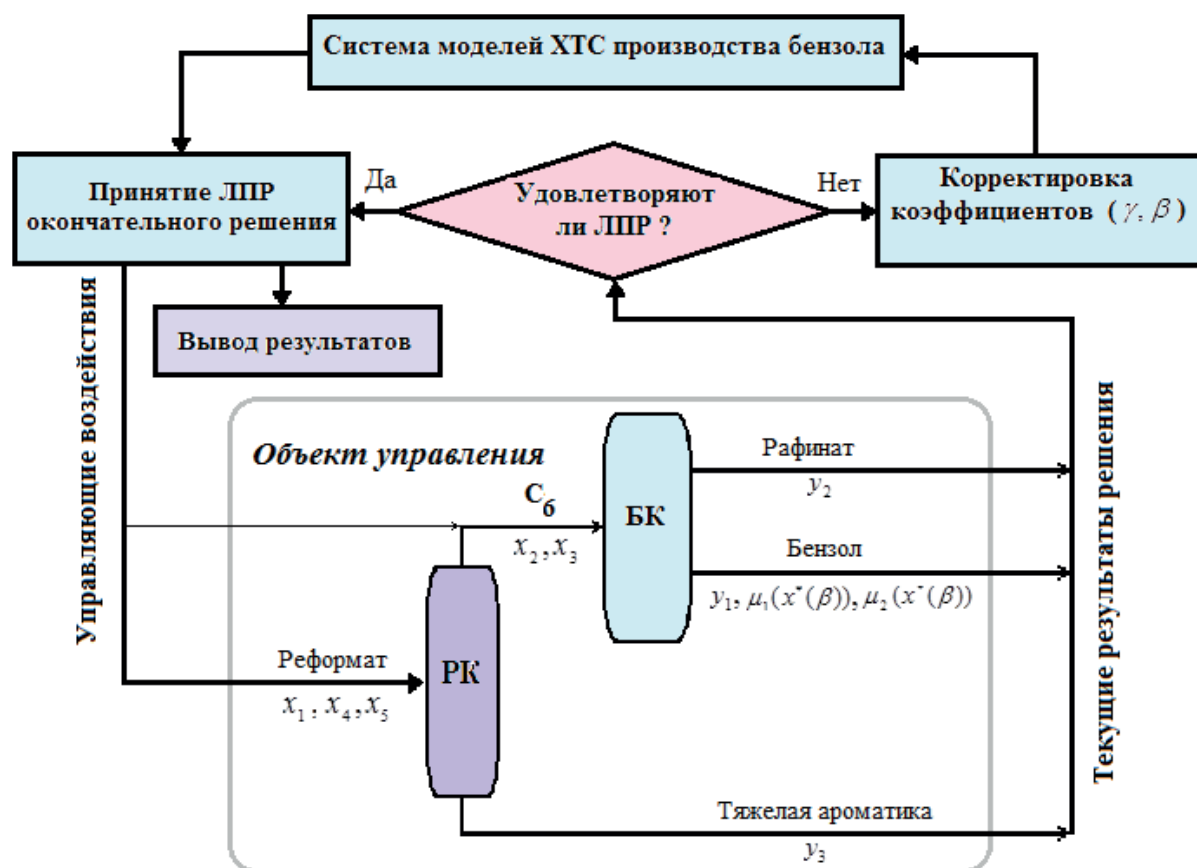


Рисунок. Схема объекта управления и процесса управления ХТС производства бензола: БК – бензольная колонна; РК – ректификационная колонна; γ и β – вектор весовых коэффициентов локальных критериев и ограничений; x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – режимные параметры, соответственно: сырье, вход реформата, x_1 , тыс. т; температура в бензольной колонне, x_2 в К; давление в бензольной колонне, x_3 , Па; доля серы в составе сырья, x_4 , %; доля ароматических углеводородов в составе сырья, x_5 , %

Figure. Scheme of the control object and the control process of the Chemical-technological system of benzene production: БК is the benzene column; γ and β are the vector of weight coefficients of local criteria and constraints; x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – regime parameters, respectively: raw materials, Reformat input, x_1 , thousand tons; temperature in a benzole column, x_2 , K; pressure in the benzene column, x_3 , Pa; share of sulfur in the composition of raw materials, x_4 , %; share of aromatic hydrocarbons in the composition of raw materials, x_5 , %

Выходными параметрами объекта управления, т. е. критериями управления являются: выход целевой продукции – бензола (y_1), объемы рафината (y_2) и тяжелой ароматики (y_3). При этом также необходимо контролировать качественные показатели бензола следующими нечеткими ограничениями: «среднее октановое число бензола не менее...»; «содержание серы в составе бензола не более...», выполнение которых обеспечивается путем контроля степени выполнения (функции принадлежности) этих нечетких ограничений: $\mu_1(x)$; $\mu_2(x)$. Процесс управления осуществляется в диалоговом режиме, на основе моделей и эвристического алгоритма с учетом предпочтения ЛПР. В результате решения задачи оптимизации режимов работы ХТС производства бензола определяются значения режимных параметров (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5), обеспечивающие лучшие значения критериев управления, не нарушая наложенных ограничений.

Конкретизируем основные параметры задачи многокритериальной оптимизации при управлении режимами работы ХТС производства бензола. Известен вектор критериев управления: $\mathbf{f}(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x))$, где $f_1(x)$ – выход бензола, $f_2(x)$ – выход рафината с бензольной колонны, $f_3(x)$ – выход тяжелой ароматики с ректификационной колонны (РК). Известны минимальные и максимальные значения рассматриваемых критериев: $f_1(x) = [(1,27 \dots 1,38) \cdot 10^8 \text{ кг}]$; $f_2(x) = [(7,7 \dots 8,6) \cdot 10^7 \text{ кг}]$; $f_3(x) = [(4,45 \dots 4,56) \cdot 10^8 \text{ кг}]$ [19].

Вектор входных и режимных параметров $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ влияет на значения критериев $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$ и нечетких ограничений $\varphi(x)$. Они могут измеряться с помощью соответствующих измерительных приборов (x_1, x_2, x_3) или определяться путем лабораторного анализа с участием человека (x_4, x_5). Интервалы изменения режимных параметров известны [20]. На основе методов экспертных оценок с привлечением ЛПР для ХТС производства бензола Атырауского НПЗ построены функции принадлежности (ФП) выполнения нечетких ограничений $\varphi(x) = (\varphi_1(x), \varphi_2(x)) - \mu_1(x)$ и $\mu_2(x)$, «среднее октановое число бензола должно быть не менее чем ($\geq$) 102», и «содержание серы в бензоле должно быть не более чем ($\leq$) 0,00005 %».

Метод построения математических моделей ХТС на основе информации различного характера, разработка моделей производства бензола в нечеткой среде

Для математической формулировки и определения зависимости каждого частного критерия $f_i(x)$, $i = \overline{1,3}$ от режимных параметров необходимо разработать математические модели основных агрегатов ХТС [11, 21, 22], описывающие зависимости критериев управления системой от ее режимных параметров. На основе методологии системного анализа нами предлагается следующий метод построения моделей ХТС с использованием до-

ступной информации различного характера, состоящий из следующих этапов (пунктов):

- 1) исследование элементов ХТС, связи между элементами, сбор и обработка доступной информации, определение цели моделирования;
- 2) определение критериев оценки, сравнения и выбора моделей, которые можно построить для элементов ХТС с учетом цели моделирования;
- 3) по выбранным критериям проведение экспертной оценки, т. е. ранжирования видов моделей, которые возможно построить для каждого элемента ХТС и по сумме значений рангов определить оптимальный тип модели каждого элемента системы [11];

3.1) если теоретические сведения для описания работы элемента ХТС достаточны и по сумме значений критериев, т. е. рангов оценки, построение детерминированной модели является эффективным, то для этого элемента на основе аналитического метода строится *детерминированная модель*;

3.2) если статистические данные для описания работы элемента ХТС доступны и по сумме рангов *статистическая модель* набирает наилучшее значение, то статистические модели этого элемента строятся на основе экспериментально-статистических методов;

3.3) если теоретические и статистические данные для описания элемента ХТС недостаточны и сбор таких данных экономически нецелесообразен, а нечеткая информация, описывающая работу данного элемента, доступна и по сумме оценки рангов нечеткая модель набирает наибольший ранг, то для него на основе методов ТНМ строятся нечеткие модели в соответствии с пунктом 4;

3.4) если теоретическая, статистическая и нечеткая информация для описания работы элемента ХТС недостаточна и построение детерминированных, статистических и нечетких моделей для этого объекта сложно или невозможно, нецелесообразно, то для этого элемента путем комбинирования доступной информации различного типа (теоретическая, статистическая, нечеткая) строится *комбинированная модель*. Для этого, в зависимости от характера исходной информации, перейти к пунктам 3.1–3.3 или 4;

- 4) определяются необходимые для построения модели нечеткие входные, режимные $\tilde{x}_i \in \tilde{A}$, $i = \overline{1, n}$ и выходные (критерии) $\tilde{y}_j \in \tilde{B}$, $j = \overline{1, m}$ параметры, где $\tilde{A} \in X$, $\tilde{B} \in Y$ – нечеткие подмножества, принадлежащие универсальным множествам X, Y . Причем параметры $x_i \in X$, $i = \overline{1, n}$ могут быть четкими;
- 5) если входные параметры объекта четкие, т. е. $x_i \in X$, $i = \overline{1, n}$, то определяются структуры нечетких уравнений множественной регрессии $\tilde{y}_j = f_j(x_1, \dots, x_n, \tilde{a}_0, \tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_n)$, $j = \overline{1, m}$ (структурная идентификация), например, на основе метода последовательного включения регрессоров;

- 6) на основе методов экспертных оценок с привлечением ЛПР описывается объект (элемент ХТС) и определяется терм-множество нечетких параметров $T(X_i, Y_j)$;
- 7) построение ФП нечетких параметров $\mu_A(\tilde{x}_i)$, $\mu_B(\tilde{y}_j)$. Для построения ФП, например, выходных параметров объекта, предлагается использовать следующую формулу:

$$\mu_{B_j}^p(\tilde{y}_j) = \exp(Q_{B_j}^p |(y_j - y_{mdj})^{N_{B_j}^p}|). \quad (1)$$

Здесь и далее p – номер кванта; $Q_{B_j}^p$ – параметр, характеризующий степень нечеткости, его значение идентифицируется при построении ФП; $N_{B_j}^p$ – коэффициент, позволяющий более точно аппроксимировать график ФП; y_{mdj}^p – такая нечеткая переменная, которая более точно соответствует выбранному терму и определяется выражением

$$\mu_{B_j}^p(y_{mdi}) = \max_j \mu_{B_j}^p(y_j);$$

- 8) если режимные параметры и критерии, т. е. входные и выходные параметры элемента ХТС, являются нечеткими (лингвистические переменные), то формализуются нечеткие отображения R_{ij} , которые определяют связи между этими лингвистическими переменными $\tilde{x}_i$ и $\tilde{y}_j$. Строятся лингвистические модели с переходом к пункту 10;
- 9) если условие пункта 5 выполняется, т. е. входные, режимные параметры четкие, то оцениваются значения нечетких коэффициентов $(\tilde{a}_0, \tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_n)$ моделей $\tilde{y}_j$ (параметрическая идентификация), структура которых идентифицирована в пункте 5 и осуществляется переходом к пункту 11;
- 10) если условие пункта 8 выполняется, т. е. и входные и выходные параметры элемента ХТС нечеткие, то на основе правил композиционного вывода $B_j = A_j \circ R_{ij}$ определяются нечеткие значения выходных параметров объекта:

$$\mu_{B_j}^p(\tilde{y}_j^*) = \max_{x_i \in X_i} \{ \min[\mu_{A_i}^p(\tilde{x}_i^*), \mu_{R_{ij}}^p((\tilde{x}_i^*, \tilde{y}_j^*))] \}, \quad (2)$$

где $\mu_{B_j}^p(\tilde{y}_j^*)$ – функция принадлежности нечетких выходных параметров на p -м кванте. Четкие, т. е. числовые значения выходных параметров объекта $\tilde{y}_j^*$ определяются из множества нечетких решений (2) по формуле:

$$\tilde{y}_j^{**} = \arg \max_{\tilde{y}_j} \mu_{B_j}^p(\tilde{y}_j^*);$$

- 11) проверяется адекватность модели. Если условие адекватности выполняется: т. е. $S = |y_m - y_e| \leq S_d$, где S и S_d – значение критерия для оценки адекватности и его допустимое значение; y_m и y_e – значения выходных параметров, полученных по модели (y_m) и по результатам экспериментов (y_e), соответственно, при одинаковых значениях входных параметров, то разработанные модели считаются адекватными и рекомендуются для применения. В противном случае, выясняется причина неадекватности и осуществляется возврат к соответствующим пунктам для устранения причин неадекватности и достижения адекватности.

Используя предложенный метод, модели ХТС производства бензола определены в виде нелинейных регрессионных уравнений, которые описывают зависимость частных критериев (выходы бензола, рафината и тяжелой ароматики) от режимных параметров x_1, x_2, x_3 :

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, x_3) = & 0,099849 x_1 + 0,020462 x_2 - 0,76 x_3 + \\ & + 0,000148 x_1^2 + 0,000008 x_2^2 - 0,032571 x_3^2 + \\ & + 0,000046 x_1 x_2 + 0,000571 x_1 x_3 - 0,000585 x_2 x_3 + \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f_2(x_1, x_2, x_3) = & 0,061562 x_1 + 0,012615 x_2 - \\ & - 0,234286 x_3 + 0,000074 x_1^2 - 0,000015 x_2^2 + \\ & + 0,013388 x_3^2 + 0,000009 x_1 x_2 + \\ & + 0,001055 x_1 x_3 - 0,000180 x_2 x_3; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} f_3(x_1, x_2, x_3) = & 0,000000001 + 0,0418920 x_1 - \\ & - 0,171690 x_2 + 3,188570 x_3 + 0,000630 x_1^2 - \\ & - 0,00013 x_2^2 + 0,136653061 x_3^2 + 0,00006 x_1 x_2 + \\ & + 0,00718 x_1 x_3 - 0,00123 x_2 x_3. \end{aligned} \quad (5)$$

Параметры уравнений (3)–(5) определены с помощью метода наименьших квадратов (с применением программ множественной регрессии «Regress»). На значения $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$ параметры x_4 – доля серы, и x_5 – доля ароматических углеводородов (УВ) в составе сырья, оказывают очень слабое влияние, поэтому ими можно пренебречь.

Для математической формализации нечетких ограничений $\varphi_1(x)$, $\varphi_2(x)$ использованы методы ТНМ, с представлением их в виде нечетких уравнений регрессии. После параметрической идентификации коэффициентов уравнений нечетких регрессий с применением системы MatLab [23] и преобразования на основе множеств уровня α (для уровней $\alpha=0,5; 0,8; 1$) идентифицированы нечеткие ограничения $\varphi_1(x_2, \dots, x_5) \geq 102$ и $\varphi_2(x_2, \dots, x_5) \leq 0,00005$.

Например, нечеткое ограничение $\varphi_1(x)$ – «среднее октановое число бензола ≥ 102 будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \varphi_1(x_2, \dots, x_5) = & \left(\frac{0,5}{0,0231} + \frac{0,8}{0,0233} + \frac{1}{0,0235} + \frac{0,8}{0,0237} + \frac{0,5}{0,0239} \right) x_2 - \\ & - \left(\frac{0,5}{0,5823} + \frac{0,8}{0,5825} + \frac{1}{0,5828} + \frac{0,8}{0,58} + \frac{0,5}{0,5834} \right) x_3 - \\ & + \left(\frac{0,5}{5000} + \frac{0,8}{5050} + \frac{1}{5100} + \frac{0,8}{5150} + \frac{0,5}{520} \right) x_4 + \\ & + \left(\frac{0,5}{1,01} + \frac{0,8}{1,015} + \frac{1}{1,02} + \frac{0,8}{1,025} + \frac{0,5}{1,03} \right) x_5 + \\ & + \left(\frac{0,5}{0,000014} + \frac{0,8}{0,000016} + \frac{1}{0,000018} + \frac{0,8}{0,00002} + \frac{0,5}{0,000022} \right) x_2^2 - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \left(\frac{0,5}{0,01655} + \frac{0,8}{0,0166} + \frac{1}{0,01665} + \frac{0,8}{0,0167} + \frac{0,5}{0,01675} \right) x_3^2 - \\
 & - \left(\frac{0,5}{12747} + \frac{0,8}{12748,5} + \frac{1}{1275} + \frac{0,8}{12751,5} + \frac{0,5}{12753} \right) x_4^2 + \\
 & + \left(\frac{0,5}{0,02443} + \frac{0,8}{0,02446} + \frac{1}{0,02448} + \frac{0,8}{0,02450} + \frac{0,5}{0,024530} \right) x_5^2 + \\
 & + \left(\frac{0,5}{0,00042} + \frac{0,8}{0,000450} + \frac{1}{0,000470} + \frac{0,8}{0,00049} + \frac{0,5}{0,00052} \right) x_2 x_5 - \\
 & - \left(\frac{0,5}{145,680} + \frac{0,8}{145,7040} + \frac{1}{145,7140} + \frac{0,8}{145,7240} + \frac{0,5}{145,740} \right) x_3 x_4 - \\
 & - \left(\frac{0,5}{0,00578} + \frac{0,8}{0,00580} + \frac{1}{0,00581} + \frac{0,8}{0,00582} + \frac{0,5}{0,00583} \right) x_3 x_5 + \\
 & + \left(\frac{0,5}{48,00} + \frac{0,8}{50,00} + \frac{1}{51,00} + \frac{0,8}{52,00} + \frac{0,5}{54,00} \right) x_4 x_5 \geq 102.
 \end{aligned}$$

Аналогично представляется нечеткое ограничение «содержание серы в бензоле должно быть не более чем ($\leq$) 0,00005 %», т. е. $\varphi_2(x_2, \dots, x_5) \leq 0,00005$.

Так как функции принадлежности нечетких коэффициентов, как правило, имеют колокообразный вид (1), имеются левые 0,5 и 0,8, а также правые 0,8 и 0,5 значения α -уровней. Для более удобного расчета производится процесс дефаззификации [23].

Для определения влияния ароматических углеводородов в составе реформата на среднее октановое число бензола на основе предложенного метода построены лингвистические модели, которые реализуют логический вывод «Чем больше ароматических углеводородов в составе сырья, тем больше среднее октановое число бензола»:

$$\begin{aligned}
 & \text{if } \tilde{x} \in \tilde{A}_1, \text{ then } \tilde{y} \in \tilde{B}_1, \text{ if } \tilde{x} \in \tilde{A}_2, \text{ then } \tilde{y} \in \tilde{B}_2, \\
 & \text{else if } \tilde{x} \in \tilde{A}_3, \text{ then } \tilde{y} \in \tilde{B}_3,
 \end{aligned}$$

где $A_1=nz$, $B_1=nn$, $A_2=nr$, $B_2=nr$, $A_3=vs$, $B_3=vn$; $\tilde{A}_i$, $\tilde{B}_j$, $i=1,3$, $j=1,3$ – нечеткие подмножества (nz – «низкое», sr – «ниже нормы», sr – «среднее», nr – «нормальное», vs – «высокое», vn – «выше нормы» – лингвистические значения); $\tilde{x}$ и $\tilde{y}$ – входные и выходные лингвистические переменные, описывающие режимные параметры и критерии, которые оценивают качество сырья и среднее октановое число бензола. Модели отображают связь между $\tilde{x}$ и $\tilde{y}$.

Для многокритериальной оптимизации при управлении ХТС производства бензола необходимо

определить и выбрать такие значения режимных параметров x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 , являющиеся управляющими воздействиями, которые обеспечивают выбранным критериям $f_i(x)$, $i=1, m$ экстремальные значения. При этом необходимо обеспечить выполнение ограничений, соблюдение технологических регламентов, которые позволяют вести процесс в устойчивом и безаварийном режиме ($x \in X$; $X = \{x \in \Omega, \varphi_q(x) > b_q, q=1, 2\}$, $x = [x^{\min}, x^{\max}]$) [24].

Задача многокритериальной оптимизации при управлении режимами работы ХТС в нечеткой информационной среде и эвристический метод ее решения. Результаты

Так как в сформулированной нами задаче многокритериальной оптимизации при управлении режимами работы ХТС производства бензола ограничения $\varphi_1(x)$ и $\varphi_2(x)$ являются нечеткими, при математической формулировке этих ограничений использован нечеткий подход и в дальнейшем при решении этой задачи эффективно применяются идеи многокритериальной оценки альтернатив, компромиссных схем, модифицированные для работы в нечеткой среде.

Приведем классификацию задач многокритериальной оптимизации применительно к специфике нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств. Можно выделить следующие виды рассматриваемых задач:

- с четкими целевыми функциями (критериями), четкими управляющими переменными, четкими ограничениями на управления, четкими функциональными ограничениями (на целевые функции);
- с четкими целевыми функциями, четкими управляющими переменными, четкими ограничениями на управления, нечеткими функциональными ограничениями;
- с четкими целевыми функциями, четкими управляющими переменными, нечеткими ограничениями на управления, нечеткими функциональными ограничениями.

Возможны другие виды задач оптимизации, которые получаются в других комбинациях. Нами в данной работе исследуется и решается задача многокритериальной оптимизации при управлении ХТС производства бензола второго вида, т. е. с четкими целевыми функциями, четкими управляющими переменными, четкими ограничениями на управления и нечеткими функциональными ограничениями;

Формализация многокритериальной задачи оптимизации при управлении режимами работы ХТС в нечеткой информационной среде.

Пусть $f(x) = f_1(x), \dots, f_m(x)$ вектор частных критериев управления, оценивающий режимы работы, т. е. качество работы ХТС. Значения этих критериев зависят от $x = (x_1, \dots, x_n)$, т. е. от вектора режимных параметров [14, 15, 25–28]. Предположим, что эту зависимость описывают математические модели, разрабатываемые на основе вышеприведенного метода. Нечеткие ограничения на

качественные показатели объекта могут быть описаны как $\varphi_q(x) \geq b_q, q=1, \overline{L}$.

Требуется выбрать такие значения режимных параметров $x=(x_1, \dots, x_n)$, которые обеспечивают наилучшие значения вектора критериев управления $f(x)=(f_1(x), \dots, f_m(x))$, при выполнении заданных нечетких ограничений. При выборке режимов работы необходимо учитывать предпочтения ЛПР.

Математическая постановка задачи. Формализованную задачу управления, в условиях многокритериальности и нечеткости, можно записать в виде следующей постановки:

$$\max_{x \in X} f_i(x), i=\overline{1, m}; \quad (6)$$

$$X = \{x \in \Omega, \varphi_q(x) \geq b_q, q=\overline{1, L}\}, \quad (7)$$

где $f_i(x), i=\overline{1, m}$ – частные критерии управления, значения которых вычисляются по моделям [11, 29, 30]; $\varphi_q(x), q=\overline{1, L}$ – функции ограничений, определяющие допустимую область Ω многокритериальной задачи (6), (7); $b_q, q=\overline{1, L}$ – заданные числа, которые могут быть нечеткими.

Решением данной задачи многокритериальной оптимизации режимов работы ХТС является значения режимных параметров $x^*=(x_1^*, \dots, x_n^*)$, обеспечивающие наилучшие значения критериев $f_i(x), i=\overline{1, m}$, которые удовлетворяют ЛПР.

В известных работах постановки таких задач в нечеткой среде и методы их решения в основном рассматриваются применительно к однокритериальным случаям, нет гибкости в учете предпочтений ЛПР. Кроме того, как правило, исходная нечеткая задача на этапе постановки с применением множеств уровня α заменяется системой эквивалентных детерминированных задач, что приведет к потере основной части собранной нечеткой информации [14, 16, 21, 31].

Часто при многокритериальной оптимизации при управлении ХТС в реальных условиях для ЛПР более привычной и основной исходной информацией является нечеткая информация в виде нечеткого высказывания и суждения специалистов. При этом преобразовать исходную нечеткую информацию в четкую информацию часто не удается или оказывается нецелесообразным. В этих условиях для эффективного решения рассматриваемой задачи необходимо разработать и применить эвристические методы, основанные на привлечение ЛПР, приспособленные к человеческим процедурам принятия решений по управлению. То есть задача многокритериальной оптимизации ставится и решается в нечеткой информационной среде, не преобразуя нечетких задач к системе детерминированных задач. С этой целью в данной работе для решения задачи многокритериальной оптимизации при управлении режимами работы ХТС в нечеткой среде предложен эвристический подход, который применяет новые и комбинацию компромиссных схем, адаптированных к применению нечеткой информации.

Постановку задачи многокритериальной оптимизации (6), (7) перепишем применительно к управлению режимами работы ХТС на основе методологии ТНМ.

Введем следующие обозначения:

$\mu_0(x)=(\mu_0^1(x), \dots, \mu_0^m(x))$ – нормализованные критерии $f_i(x), i=\overline{1, m}$, определяющие качества работы ХТС, принимающие значения в интервале $[0, 1]$; $\mu_q(x), q=\overline{1, L}$ – функции принадлежности выполнения нечетких ограничений $\varphi_q(x) \geq b_q, q=\overline{1, L}$; $\gamma=(\gamma_1, \dots, \gamma_m), \beta=(\beta_1, \dots, \beta_L)$ – соответственно, весовые векторы, задаваемые ЛПР и определяющие взаимную важность критериев и ограничений.

С целью адаптации различных компромиссных схем для обеспечения работы при нечеткой информации можно сформулировать различные задачи многокритериальной оптимизации при управлении режимами работы ХТС в виде задач многокритериальной нечеткой оптимизации (нечеткого математического программирования) и разработать методы их решения [15, 30, 32].

Часто на практике при решении рассмотренных задач достаточно выполнения некоторых принципов оптимальности с определенной уступкой. Предлагаем использовать *модифицированные для работы в нечеткой среде принципы квазимаксимина* (для критериев) и *идеальной точки* (для ограничений).

Тогда постановка многокритериальной задачи оптимизации при управлении режимами работы ХТС в нечеткой среде имеет вид:

$$\max_{x \in X} \mu_0^1(x), \quad (8)$$

$$X = \left\{ x : \arg \max_{x \in \Omega} \min_{i \in I_0} (\gamma_i \mu_0^i(x) - \Delta_i) \wedge \arg (\mu_q(x) \geq) \right. \\ \left. \geq \min \|\mu(x) - \mu^u\|_D, I_0 = \{2, \dots, m\}, q = \overline{1, L} \right\}. \quad (9)$$

В (9) $\|\mu(x) - \mu^u\|_D$ – метрика, оценивающая расстояние от текущего решения $\mu(x)$ до идеального решения μ^u ; $\mu^u=(\max \mu_1(x), \dots, \max \mu_m(x))$ – координата идеальной точки (решения), если функции принадлежности нормальные, то $\mu^u=(1, \dots, 1)$; Ω – исходное множество определения переменных x , I_0 – множество индексов критериев, перенесенных в ограничения.

В постановке (8), (9) при управлении режимами работы ХТС решается задача максимизации самого важного критерия с приоритетом 1, остальные частные критерии вводятся в состав ограничений на основе принципа квазимаксимина с учетом введенных ЛПР уступок $\Delta_i, i=\overline{2, m}$, а степени выполнения нечетких ограничений проверяются на основе идеи принципа идеальной точки.

Рассмотрим другую комбинацию использования принципов оптимальности: *максимина* (для критериев) и *Парето оптимальности* (для ограничений), при постановке и решении задачи многокритериальной оптимизации при управлении режимами работы ХТС. При этом исходную задачу можно записать в следующей постановке:

$$\max_{x \in X} \mu_0^1(x), \quad (10)$$

$$X = \left\{ \begin{array}{l} \arg \max_{x \in \Omega} \min_{i \in I_0} (\gamma_i \mu_0^i(x)) \wedge \\ \wedge \arg \max_{x \in \Omega} \sum_{q=1}^L \beta_q \mu_q(x) \wedge \\ \wedge \sum_{q=1}^L \beta_q = 1 \wedge \beta_q \geq 0, I_0 = \{2, \dots, m\}, q = \overline{1, L} \end{array} \right\}. \quad (11)$$

В задаче (10), (11) максимизируется главный критерий с приоритетом 1, остальные критерии вводятся в состав ограничений по принципу максимина (ММ), а нечеткие ограничения учитываются на основе принципа Парето оптимальности (ПО). Предлагается следующий *эвристический алгоритм* для решения задачи (10), (11).

А л г о р и т м ММ+ПО:

1. В диалоговом режиме с ЛПР определяются значения весовых коэффициентов для частных критериев

$$\mu_0^i(x), i = \overline{1, m}, \gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_m), \sum_{i=1}^m \gamma_i = 1, \gamma_i \geq 0.$$

2. В диалоге с ЛПР определяются значения весовых коэффициентов для ограничений $\mu_q(x)$,

$$q = \overline{1, L}: \beta = (\beta_1, \dots, \beta_L), \sum_{q=1}^L \beta_q = 1, \beta_q \geq 0, q = \overline{1, L}.$$

3. Задается $p_q(x)$, $q = \overline{1, L}$ – число шагов по каждой q -й координате.

4. С целью изменения координат вектора β_q по вы-

ражению $h_q = \frac{1}{p_q}$, $q = \overline{1, L}$ определяются величины шагов.

5. Варьируя координаты с шагом h_q в интервале $[0, 1]$, определяется набор весовых векторов $\beta^1, \beta^2, \dots, \beta^N$, $N = (p_1 + 1) \times (p_2 + 1) \times \dots \times (p_L + 1)$.

6. С привлечением ЛПР, экспертов выбирается терм-множество и строятся функции принадлежности выполнения для нечетких ограничений $\mu_q(x)$, $q = \overline{1, L}$.

7. На основе модели ХТС решается задача максимизации главного (первого) критерия $\max_{x \in X} \mu_0^1(x)$

(10) на множестве X , которое определяется по выражению (11). Определяются текущие решения: значения режимных параметров $x(\gamma, \beta)$; значения критериев $\mu_0^1(x(\gamma, \beta)), \dots, \mu_0^m(x(\gamma, \beta))$ и степени выполнения нечетких ограничений $\mu_1(x(\gamma, \beta)), \dots, \mu_L(x(\gamma, \beta))$.

8. ЛПР анализирует текущие решения. Если текущие решения не удовлетворяют ЛПР, то им корректируются значения весовых коэффициентов $\gamma_1, \dots, \gamma_m$ и/или $\beta_1, \dots, \beta_L$, и выполняется переход обратно к пункту 3. В противном случае, перейти к следующему пункту 9.

9. Прекращается поиск решений, и выводятся оптимальные, т. е. выбранные ЛПР, окончательные результаты, которые обеспечивают оптимальные режимы при управлении ХТС: оптимальные зна-

чения режимных (управляющих) параметров $x^*(\gamma, \beta)$, обеспечивающие лучшие значения частных критериев $\mu_0^1(x^*(\gamma, \beta)), \dots, \mu_0^m(x^*(\gamma, \beta))$ и максимальные степени выполнения нечетких ограничений $\mu_1(x^*(\gamma, \beta)), \dots, \mu_L(x^*(\gamma, \beta))$.

Таким образом, получены различные постановки задачи многокритериальной оптимизации при управлении режимами работы ХТС в нечеткой информационной среде. На основе различных принципов оптимальности (максимина и Парето оптимальности) и методов ТНМ предложен новый эвристический алгоритм решения ММ+ПО.

Применение и обсуждение результатов

В качестве примера реализации предложенного нечеткого подхода к решению задачи многокритериальной оптимизации при управлении режимами работы ХТС рассмотрим постановки и решения задачи управления режимами работы ХТС производства бензола Атырауского НПЗ. Используя вышеприведенные результаты исследования и на основе модификации методов максимина и принципа Парето оптимальности, задачу многокритериальной оптимизации режимов работы ХТС производства бензола можно формализовать и сформулировать следующим образом:

Введем следующие обозначения: $\mu_0(x) = (\mu_0^1(x), \mu_0^2(x), \mu_0^3(x))$ – нормализованный критерий (в интервале $[0, 1]$), оценивающий выход продукции ХТС производства бензола ($\mu_0^1(x)$ – выход бензола, $\mu_0^2(x)$ – выход рафината, $\mu_0^3(x)$ – выход тяжелой ароматики); $\mu_1(x), \mu_2(x)$ – ФП выполнения нечетких ограничений $\varphi_q(x) \gtrsim b_q$, $q = 1, 2$; $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ и $\beta = (\beta_1, \beta_2)$ – весовые векторы, отражающие взаимную важность критериев и ограничений.

Тогда математическую постановку задачи многокритериальной оптимизации при управлении ХТС производства бензола на основе задачи (10), (11) можно записать в следующем виде:

$$\max_{x \in X} \mu_0^1(x), \quad (12)$$

$$X = \left\{ \begin{array}{l} \arg \max_{x \in \Omega} \min_{i \in I_0} (\gamma_i \mu_{0R}^i(x)) \wedge \\ \wedge \arg \max_{x \in \Omega} \sum_{q=1}^2 \beta_q \mu_q(x) \wedge \\ \wedge \sum_{q=1}^2 \beta_q = 1 \wedge \beta_q \geq 0, I_0 = \{2, 3\}, q = \overline{1, 2} \end{array} \right\}. \quad (13)$$

В постановке (12)–(13): $\wedge$ – логический «и», который означает, что все связываемые им утверждения являются истинными: μ_{0R}^i – введенные ЛПР ограничения для критериев $\mu_0^i(x)$, $i = 2, 3$. Варьируя значения весовых коэффициентов локальных критериев $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ и ограничений β_1, β_2 , получаем семейство решений задачи (12), (13), среди которых ЛПР выбирает оптимальные значения режимных параметров $x^*(\gamma, \beta)$, обеспечивающие максимальные значения критериев, не нарушая ограничений.

Для решения поставленной задачи многокритериальной оптимизации при управлении режимами работы ХТС производства бензола (12), (13) используем комбинацию модифицированных методов *максимина (ММ)* и *Парето оптимальности (ПО)*.

Приведем конкретизацию алгоритма *ММ+ПО* для решения задачи (12), (13).

1. В диалоге с ЛПР определены и введены значения весовых коэффициентов частных критериев $\mu_0^i(x)$,

$$i=\overline{1,3} \sum_{i=1}^3 \gamma_i = 1, \gamma_i \geq 0, i=\overline{1,2,3}: \gamma=(0,7;0,2;0,1).$$

2. В диалоге с ЛПР экспертами определены значения весовых коэффициентов для ограничений

$$\mu_q(x), q=\overline{1,3}, \sum_{q=1}^2 \beta_q = 1, \beta_q \geq 0, q=\overline{1,2}: \beta=(0,7;0,3).$$

3. ЛПР заданы $p_q, q=\overline{1,2}$ – количество шагов по координатам: $p_1=5; p_2=2$.

4. Вычислены $h_q = \frac{1}{p_q}, q=\overline{1,2}$ – величины шагов

для изменения координат весового вектора β_q :

$$h_1 = \frac{1}{p_1} = \frac{1}{5} = 0,2; h_2 = \frac{1}{p_2} = \frac{1}{2} = 0,5.$$

5. Определены весовые векторы $\beta^1, \beta^2, \dots, \beta^N$, $N=(5+1) \times (2+1)=18$ варьированием координат на отрезках $[0,1]$ с шагом $h_q, q=\overline{1,2}$.

6. Определено терм-множество и построены ФП выполнения ограничений $\mu_q(x), q=\overline{1,2}$. Задача описывается двумя нечеткими ограничениями: «среднее октановое число бензола ≤ 102 » и «доля серы в составе бензола $\leq 0,00005\%$ ». Для описания этих нечетких ограничений определено следующее терм-множество: $T(X,Y)=\{\text{низкое, ниже среднего, среднее, выше среднего, высокое}\}$. С применением приведенного терм-множества $T(X,Y)$ на основе формулы (1) построены ФП, описывающие степени выполнения нечетких ограничений:

$$\mu_1^1(x) = \exp((0.5 | y_4 - 97) 0.60 |);$$

$$\mu_1^2(x) = \exp((0.5 | y_4 - 100) 0.55 |);$$

$$\mu_1^3(x) = \exp((0.5 | y_4 - 102) 0.50 |);$$

$$\mu_1^4(x) = \exp((0.5 | y_4 - 104) 0.55 |);$$

$$\mu_1^5(x) = \exp((0.5 | y_4 - 107) 0.60 |);$$

$$\mu_2^1(x) = \exp((0.3 | y_5 - 0.000005) 0.15 |);$$

$$\mu_2^2(x) = \exp((0.3 | y_5 - 0.000020) 0.12 |);$$

$$\mu_2^3(x) = \exp((0.3 | y_5 - 0.000050) 0.10 |);$$

$$\mu_2^4(x) = \exp((0.3 | y_5 - 0.000080) 0.12 |);$$

$$\mu_2^5(x) = \exp((0.3 | y_5 - 0.000100) 0.15 |),$$

где $\mu_1^p(x), \mu_2^p(x), p=\overline{1,5}$ – ФП, описывающие степени выполнения нечетких ограничений для каждого кванта p на среднее октановое число бензола ($\mu_1^p(x)$) и доли серы в составе бензола ($\mu_2^p(x)$), y_4 и y_5 – числовые значения нечетких по-

казателей качества бензола, полученные на основе множества уровня α , остальные коэффициенты рассмотрены при описании формулы (1).

7. На основе вышеприведенных моделей (3)–(5) и нечетких ограничений, описывающих зависимости частных критериев от режимных параметров:

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, \text{ решена задача } \max_{x \in X} \mu_0^1(x)$$

(12) на множестве X (13). Критерии максимизированы на множестве X с учетом коэффициентов важности, которые определены в пункте 1. Определены текущие решения: значения режимных параметров $x(\gamma, \beta)$ и соответствующие им значения частных критериев $\mu_0^1(x^*(\gamma, \beta)), \mu_0^2(x^*(\gamma, \beta)), \mu_0^3(x^*(\gamma, \beta))$, и степени выполнения нечетких ограничений $\mu_1(x^*(\gamma, \beta)), \mu_2(x^*(\gamma, \beta))$. Здесь можно применить наиболее подходящий метод решения поставленной задачи, в нашем случае использован модифицированный для работы в нечеткой среде метод штрафных функций.

8. Полученные решения предъявлены ЛПР. Если текущие результаты не удовлетворяют ЛПР, то он производит корректировку значения γ и (или) β , и осуществляется возврат к пункту 2. В случае удовлетворения ЛПР осуществляется переход к пункту 9. В нашем случае ЛПР удовлетворяющие его решения выбрал после 5-го цикла, и эти результаты занесены в таблицу.

9. Остановка поиска решения, вывод удовлетворяющих ЛПР окончательных решений, обеспечивающих оптимальный режим ХТС производства бензола: оптимальные значения режимных параметров $x_1^*(\gamma, \beta), x_2^*(\gamma, \beta), x_3^*(\gamma, \beta), x_4^*(\gamma, \beta), x_5^*(\gamma, \beta)$; максимальные значения частных критериев $\mu_0^1(x^*(\gamma, \beta)), \mu_0^2(x^*(\gamma, \beta)), \mu_0^3(x^*(\gamma, \beta))$ и максимальные степени выполнения нечетких ограничений $\mu_1(x^*(\gamma, \beta)), \mu_2(x^*(\gamma, \beta))$ (таблица).

Обсуждение результатов. В результате анализа данных, приведенных в таблице, можно сделать следующие выводы:

1. Предложенный *эвристический алгоритм ММ+ПО* позволяет решить исходную задачу с нечеткими ограничениями без предварительного преобразования их в детерминированный вариант, по сравнению с детерминированным методом, по некоторым показателям обеспечивает лучшие результаты.
2. При решении многокритериальной задачи в нечеткой постановке адекватность решения улучшается, так как дополнительно используется нечеткая информация (знание, опыт ЛПР и экспертов), позволяющая адекватно описать реальную ситуацию без идеализации.
3. Алгоритм *ММ+ПО* позволяет определить функцию принадлежности, т. е. степень выполнения нечетких ограничений, обеспечивает решение задачи с нечеткими ограничениями, что часто возникают в производственных условиях.
4. В процессе решения задачи с помощью ЛПР можно определить компромиссное решение между количеством и качеством продукции.

Таблица. Сравнение результатов оптимизации режимов работы ХТС по детерминированному методу, по предложенному алгоритму и реальных значений

Table. Comparison of Chemical-technological system work modes' optimization results by deterministic method, proposed algorithm and actual values

Значения критериев управления и ограничений Values of control criteria and constraints	Детерминированный метод [33] Deterministic method [33]	Предложенный алгоритм Proposed algorithm	Реальные значения Actual values
Выход бензола с бензольной колонны, кг – критерий y_1 Output of benzene from the benzene column, kg – criterion y_1	$1,33 \cdot 10^8$	$1,341 \cdot 10^9$	$1,30 \cdot 10^8$
Выход рафината с бензольной колонны, кг – критерий y_2 Output of the raffinate from the benzene column, kg – criterion y_2	$8,2 \cdot 10^7$	$8,24 \cdot 10^8$	$8,0 \cdot 10^7$
Выход тяжелой ароматики с ректификационной колонны, кг – критерий y_3 Output of heavy aromatics from the distillation column, kg – criterion y_3	$4,50 \cdot 10^8$	$4,50 \cdot 10^8$	$4,50 \cdot 10^8$
ФП выполнения нечеткого ограничения. Среднее октановое число бензола должно быть не менее $\geq 102 - \mu_1(x^*(\beta))$ Membership function fulfillment of a fuzzy constraint. Average octane number of benzole should be at least $\geq 102 - \mu_1(x^*(\beta))$	–	1,0	–
ФП выполнения нечеткого ограничения. Содержание серы в составе бензола должно быть не более $\leq 0,00005 \% - \mu_2(x^*(\beta))$ Membership function fulfillment of a fuzzy constraint. Sulfur content of benzole should be no more than $\leq 0,00005 \% - \mu_2(x^*(\beta))$	–	1,0	–
Оптимальные значения режимных параметров / Optimal values of the operating parameters: x_1^* – сырье, вход реформата, кг; raw materials, the input of the reformat, kg; x_2^* – температура в бензольной колонне, К; temperature in the benzole column, K; x_3^* – давление в бензольной колонне, кПа; pressure in the benzole column, kPa; x_4^* – доля серы в составе сырья, %; share of sulphur in the composition of raw materials, %; x_5^* – доля аром. УВ в составе сырья, %; share of aromatic hydrocarbons in the composition of raw materials, %	$7,46 \cdot 10^8$ 423,5 3628 0,00005 50	$7,46 \cdot 10^8$ 418 3432 0,00005 50	$7,46 \cdot 10^8$ 423,5 3628 0,00005 50

Примечание: В детерминированном подходе и на практике степени выполнения нечетких ограничений не определяются, поэтому в соответствующие графы таблицы занесены (–). Реальные значения параметров в таблице соответствуют значениям технологических параметров одного из режимов установки производства бензола Атырауского НПЗ.

Note: In the deterministic approach and in practice, the degree of implementation of fuzzy constraints is not defined, therefore (–) is entered in the corresponding columns of the table. The actual values of the parameters in the table correspond to the values of the technological parameters of one of the modes of the installation of benzene production of the Atyrau refinery.

Таким образом, чтобы улучшить качество продукции придется уменьшить объем её выпуска. Поэтому постановка задачи максимизации объема выхода бензола с одновременным улучшением его качества является некорректной. В этом случае может быть два варианта корректной постановки задачи:

- 1) максимизация выхода продукции с обеспечением показателей качества не менее чем заданные значения, т. е. введением и учетом ограничения на качество;
- 2) максимальное улучшение качества продукции с обеспечением заданного объема на выход продукции, т. е. введением и учетом ограничения на объем продукции.

Приведенные в таблице результаты показывают эффективность предложенного эвристического алгоритма решения задачи управления режимами работы ХТС в нечеткой постановке, так как по сравнению с результатами известных методов [33] по всем показателям он показывает не худшие результаты, а по выходу бензола и рафината результаты улучшены.

Кроме того, алгоритм ММ+ПО позволяет учитывать нечеткие ограничения, определяет степени выполнения нечетких ограничений. Как видно из таблицы, обеспечено полное выполнение нечетких

ограничений, т. е. их функции принадлежности равны 1: $\mu_1(x^*(\gamma, \beta))=1$; $\mu_2(x^*(\gamma, \beta))=1$.

Заключение

Разработан метод построения математических моделей ХТС в условиях неопределенности и нечеткости исходной информации на основе информации различного характера. Впервые получены постановки задач управления режимами работы ХТС при нечеткой информации в виде задачи нечеткого математического программирования. На основе модификации методов максимина и Парето оптимальности для работы в нечеткой информационной среде разработан эвристический алгоритм ММ+ПО решения полученной задачи. Новизна и оригинальность результатов заключается в том, что задачи многокритериальной оптимизации при управлении ХТС ставятся и решаются в нечеткой информационной среде без предварительного преобразования их к детерминированным эквивалентным задачам. Это обеспечивает правильность и эффективность управления за счет повышения адекватности описания производственных задач при нечеткой информации.

Предложенные подходы реализованы при построении математических моделей и решении задачи многокритериальной оптимизации при управ-

влении режимами работы ХТС производства бензола при нечеткой информации. Результаты исследования расширяют круг решаемых практических

задач, позволяют моделировать и управлять режимами работы сложных ХТС с учетом их многокритериальности и нечеткости исходной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джарратино Д. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. 4-е изд. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. – 1152 с.
2. Gronostajski Z. The expert system supporting the assessment of the durability of forging tools // International journal of advanced manufacturing technology. – 2016. – V. 82. – № 9. – P. 1973–1991.
3. Sabzi H.Z. Developing an intelligent expert system for streamflow prediction, integrated in a dynamic decision support system for managing multiple reservoirs: a case study // Expert systems with applications. – 2017. – V. 82. – № 3. – P. 145–163.
4. Expert system for polyester exhaust dyeing / J.J. Lin, J. Lee, K.L. Cheng, F.B. Lin // AATCC Review. – 2001. – V. 1. – № 1. – P. 41–44.
5. Kahraman C. Fuzzy Multi-Criteria Decision Making // Theories and Applications with Recent Developments. – New York: Springer, 2008. – P. 592–608.
6. Dubois D. The role of fuzzy sets in decision sciences: old techniques and new directions // Fuzzy Sets and Systems. – 2011. – V. 184. – P. 3–17.
7. Сулейменов Б.А. Интеллектуальные и гибридные системы управления технологическими процессами. – Алматы: Изд-во «Пикун и К», 2009. – 304 с.
8. Оразбаев Б.Б. Теория и практика методов нечетких множеств. – Алматы: Изд-во «Бастау», 2014. – 455 с.
9. Рыжов А.П. Теория нечетких множеств и ее приложений. – М.: Изд-во МГУ, 2017. – 115 с.
10. Grossmann I.E. Challenges in the Application of Mathematical Programming in the Enterprise-wide Optimization of Process Industries // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2014. – V. 48. – № 5. – P. 500–518.
11. Orazbayev B.B., Orazbayeva K.N., Utenova B.E. Development of Mathematical Models and Modeling of Chemical Engineering Systems under Uncertainty // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2014. – V. 48. – № 4. – P. 138–149.
12. Волин Ю.М., Островский Г.М. Многокритериальная оптимизация технологических процессов в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. – 2007. – Т. 53. – № 3. – С. 165–178.
13. Pavlov S.Yu., Kulov N.N., Kerimov R.M. Improvement of Chemical Engineering Processes Using Systems Analysis // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2016. – V. 53. – № 2. – P. 117–133.
14. Зайченко Ю.П. Исследование операций: нечеткая оптимизация. – Киев: Изд-во Выща школа, 1991. – 357 с.
15. Multicriteria optimisation problems for chemical engineering systems and algorithms for their solution based on fuzzy mathematical methods / B.B. Orazbayev, K.N. Orazbayeva, L.T., Kurman-gazyeva V.E. Makhatova // EXCLI Journal. – 2015. – V. 14. – P. 984–998.
16. Biegler L.T., Lang Y.D., Lin W.J. Multi-scale Optimization for Process Systems Engineering // Computers and Chemical Engineering. – 2016. – № 10. – P. 17–35.
17. Секретарев Ю.А., Мятаж Т.В., Мошкин Б.Н. Математическая модель управления функционированием генерирующей компании в современных условиях // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 146–158.
18. Валиахметов Р.И. и др. Применение эвристических алгоритмов в анализе данных для решения задачи диагностирования электроцентробежных насосных установок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 159–167.
19. Control of Fuzzy Technological Objects Based on Mathematical Model / B.B. Orazbayev, Y.A. Ospanov, K.N. Orazbayeva, T. Gancarczyk, A. Shaikhanova // 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2016). – Gyengju, Korea, 18–19 October 2016. – P. 1487–1493.
20. Технологический регламент технологического комплекса по производству бензола. – Атырау: Атырауский нефтеперерабатывающий завод, 2017. – 387 с.
21. A Blended Risk Index Modeling and Visualization Based on Hierarchical Fuzzy Logic for Water Supply Pipelines Assessment and Management / M. Fayaz, S. Ahmad, I. Ullah, D. Kim // Processes. – 2018. – V. 6. – № 5. – P. 102–112.
22. Дмитриевский Б.С., Затонский А.В., Тугашова Л.Г. Задача управления процессом ректификации нефти и метод ее решения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 136–145.
23. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: Изд-во «Петербург», 2003. – 787 с.
24. Optimization of Chemical Process Design with Chance Constraints by an Iterative Partitioning Approach / G.M. Ostrovsky, N.N. Ziyatdinov, T.V. Lapteva, A. Silvestrova // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2015. – V. 54. – № 13. – P. 3412–3437.
25. Optimization-based design of crude oil distillation units using surrogate column models and a support vector machine / D. Ibrahim, M. Jobson, J. Li, G. Guillen-Gosalbez // Chemical engineering research & design. – 2018. – V. 134. – P. 212–225.
26. Multi-criteria design of shale-gas-water supply chains and production systems towards optimal life cycle economics and greenhouse gas emissions under uncertainty / Y. Chen, L. He, J. Li, S. Zhang // Computers & chemical engineering. – 2018. – V. 109. – P. 216–235.
27. Harinath E., Biegler L.T., Dumont G.A. Predictive optimal control for thermo-mechanical pulping processes with multi-stage low consistency refining // Journal of Process Control. – 2013. – V. 47. – № 23. – P. 1001–1015.
28. Novak Z., Kravanja Z. Mixed-integer nonlinear programming problem process synthesis under uncertainty by reduced dimensional stochastic optimization // Industrial & engineering chemistry research. – 1999. – V. 38. – № 7. – P. 2680–2698.
29. Мешалкин В.П., Гимаров В.А., Зайцевский И.В. Локальные математические модели для управления промышленным предприятием. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2003. – 456 с.
30. Оразбаев Б.Б. Методы моделирования и принятия решений для управления производством в нечеткой среде. – Астана: Изд-во Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, 2016. – 398 с.
31. State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes / C.A. Méndez, J., Cerdá I.E. Grossmann, I. Harjunkoski, M. Fahl // Computers and Chemical Engineering. – 2006. – № 30. – P. 913–928.
32. Grossmann I.E. Challenges in the Application of Mathematical Programming in the Enterprise-wide Optimization of Process Industries // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48. – № 5. – С. 500–517.
33. Шумский В.М., Зырянова Л.А. Инженерные задачи в нефтепереработке и нефтехимии. – М.: Изд-во «Химия», 1981. – 457 с.

Поступила 15.11.2018 г.

Информация об авторах

Оразбаев Б.Б., доктор технических наук, профессор кафедры Системного анализа и управления Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева.

Оспанов Е.А., докторант кафедры Системного анализа и управления Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева.

Оразбаева К.Н., доктор технических наук, профессор кафедры Менеджмента и маркетинга Казахского университета экономики, финансов и международной торговли.

Серимбетов Б.А., кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информатики и прикладной экономики Казахского университета экономики, финансов и международной торговли.

UDC 665.63: 51.001.57

MULTICRITERIA OPTIMIZATION IN CONTROL OF A CHEMICAL-TECHNOLOGICAL SYSTEM FOR PRODUCTION OF BENZENE WITH FUZZY INFORMATION

Batyr B. Orazbayev¹,
batyr_o@mail.ru

Yerbol A. Ospanov¹,
780ea@mail.ru

Kulman N. Orazbayeva²,
kulman_o@mail.ru

Bulat A. Serimbetov²,
sba_mmc@mail.ru

¹ L.N. Gumilev Eurasian National University,
11, Pushkin Street, Astana, 010008, Kazakhstan.

² Kazakh University of Economics, Finance and International Trade,
7, Zhubanov Street, Astana, 010005, Kazakhstan.

The relevance of the research is caused by the need to solve effectively the problems of controlling the operating modes of chemical-technological systems, which are multi-criteria, characterized by the uncertainty and fuzziness of the initial information. Since real chemical-technological systems in production are multi-criteria and often work in the conditions of unclear initial information, formalization and effective solution of such problems in a fuzzy environment is very important and relevant for science and production.

The main aim of the research is to develop a method for constructing mathematical models of chemical-technological systems based on available information of various kinds (theoretical, statistical, expert, fuzzy information); get multicriteria optimization problem statement to control such systems and develop a heuristic approach to its solution; also, to test the results obtained in practice for construction of mathematical models of chemical-technological system for benzene production and the control modes of its operation in a fuzzy environment.

Objects: complex chemical-technological systems with the example of a technological plant for production of benzene, which are described by a vector of criteria and characterized by unclear initial information.

Methods: methods of system analysis and fuzzy sets theories, methods of mathematical modeling and multi-criteria choice, experimental statistical methods for developing mathematical models.

Results. The authors have proposed the method for developing mathematical models of chemical-technological systems based on available information of various types, including initial fuzzy information. The new tasks of control of the chemical technological systems in the conditions of fuzziness of the initial information obtained by modifications of various compromise schemes for working in a fuzzy environment. The tasks of multicriteria optimization in controlling technological system are reduced to multicriteria problems of fuzzy mathematical programming and based on modifying the principles of maximin and Pareto optimality, heuristic algorithm for solving the formulated problem of optimal control is developed. These results are realized in practice in constructing mathematical models of the main aggregates of the chemical-technological system for production of benzene and in setting and solving the task of controlling the operating modes of this system in a fuzzy environment. Analysis and comparison of the obtained results allow drawing a conclusion about the effectiveness of the proposed approach to solving control problems on the basis of models in conditions of indistinct initial information.

Key words:

Chemical-technological system, mathematical modeling, fuzzy information, principles of optimality, benzene, heuristic algorithm, tasks control of operating modes.

REFERENCES

1. Jarratino D. *Ekspertnye sistemy: printsipy razrabotki i programirovaniye* [Expert systems: principles of development and programming]. Moscow, I.D. Vilyams Publ., 2007. 1152 p.
2. Gronostajski Z. The expert system supporting the assessment of the durability of forging tools. *International journal of advanced manufacturing technology*, 2016, vol. 82, no. 9, pp. 1973–1991.
3. Sabzi H.Z. Developing an intelligent expert system for stream-flow prediction, integrated in a dynamic decision support system for managing multiple reservoirs: a case study. *Expert systems with applications*, 2017, vol. 82, no. 3, pp. 145–163.
4. Lin J.J., Lee J., Cheng K.L., Lin F.B. Expert system for polyester exhaust dyeing. *AATCC Review*, 2001, vol. 1, no. 1, pp. 41–44.
5. Kahraman C. Fuzzy Multi-Criteria Decision Making. *Theories and Applications with Recent Developments*. New York, Springer, 2008. pp. 592–608.
6. Dubois D. The role of fuzzy sets indecision sciences: old techniques and new directions. *Fuzzy Sets and Systems*, 2011, vol. 184, pp. 3–17.
7. Suleymenov B.A. *Intellectualnye i gibridnye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami* [Intelligent and hybrid process control systems]. Almaty, Pikula and K Publ., 2009. 304 p.
8. Orazbayev B.B. *Teoriya i praktika metodov nechetkikh mnozhestv* [Theory and practice of methods of fuzzy sets]. Almaty, Bastau Publ., 2014. 455 p.
9. Ryzhov A.P. *Teoriya nechetkikh mnozhestv i ee prilozheniy* [The theory of fuzzy sets and its applications]. Moscow, MSU Publ., 2017. 115 p.

10. Grossmann I.E. Challenges in the Application of Mathematical Programming in the Enterprise-wide Optimization of Process Industries. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2014, vol. 8, no. 5, pp. 500–518.
11. Orazbayev B.B., Orazbayeva K.N., Utenova B.E. Development of Mathematical Models and Modeling of Chemical Engineering Systems under Uncertainty. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2014, vol. 48, no. 4, pp. 138–149.
12. Volin Yu.M., Ostrovsky G.M. Multicriteria optimization of technological processes in conditions of uncertainty. *Automation and Remote Control*, 2007, vol. 53, no. 3, pp. 165–178. In Rus.
13. Pavlov S.Yu., Kulov N.N., Kerimov R.M. Improvement of Chemical Engineering Processes Using Systems Analysis. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2016, vol. 53, no. 2, pp. 117–133.
14. Zaichenko Yu.P. *Issledovanie operatsiy: nechetskaya optimizatsiya* [Operations research: fuzzy optimization]. Kyiv, Vyscha shkola Publ., 1991. 357 p.
15. Orazbayev B.B., Orazbayeva K.N., Kurmangazyeva L.T., Makhatova V.E. Multicriteria optimisation problems for chemical engineering systems and algorithms for their solution based on fuzzy mathematical methods. *EXCLI Journal*, 2015, vol. 14, pp. 984–998.
16. Biegler L.T., Lang Y.D., Lin W.J. Multi-scale Optimization for Process Systems Engineering. *Computers and Chemical Engineering*. 2016, no. 10, pp. 17–35.
17. Sekretarev Y.A., Myatezh T.V., Moshkin B.N. Mathematical model for controlling generation company functioning under modern conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 146–158. In Rus.
18. Valiakhmetov R.I. Application of heuristic algorithms in analyzing data to solve the problem of detection of electric centrifugal pumping units. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 159–167.
19. Orazbayev B.B., Ospanov Y.A., Orazbayeva K.N., Gancarczyk T., Shaikhanova A. Control of Fuzzy Technological Objects Based on Mathematical Model. *16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2016)*. Gyeongju, Korea, October 18–19, 2016, pp. 1487–1493.
20. *Tekhnologicheskii reglament tekhnologicheskogo kompleksa po proizvodstvu benzol* [Technological regulations of the technological complex for the production of benzene]. Atyrau, Atyrau Oil production Plant Publ., 2017. 387 p.
21. Fayaz M., Ahmad, S., Ullah I., Kim D. A Blended Risk Index Modeling and Visualization Based on Hierarchical Fuzzy Logic for Water Supply Pipelines Assessment and Management. *Processes*, 2018, vol. 6, no. 5, pp. 102–112.
22. Dmitrievsky B.S., Zatonitskiy A.V., Tugashova L.G. Task of controlling oil rectification and the method of its solution. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 136–145. In Rus.
23. Leonenkov A. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzy-TECH* [Fuzzy modeling in the environment of MATLAB and fuzzyTECH]. St-Petersburg, Peterburg Publ., 2003. 787 p.
24. Ostrovsky G.M., Ziyatdinov N.N., Lapteva T.V., Silvestrova A. Optimization of Chemical Process Design with Chance Constraints by an Iterative Partitioning Approach. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, vol. 54, no. 13, pp. 3412–3437.
25. Ibrahim D., Jobson M., Li J., Guillen-Gosalbez, G. Optimization-based design of crude oil distillation units using surrogate column models and a support vector machine. *Chemical engineering research & design*, 2018, vol. 134, pp. 212–225.
26. Chen Y., He L., Li J., Zhang S. Multi-criteria design of shale-gas-water supply chains and production systems towards optimal life cycle economics and greenhouse gas emissions under uncertainty. *Computers & chemical engineering*, 2018, vol. 109, pp. 216–235.
27. Harinath E., Biegler L.T., Dumont G.A. Predictive optimal control for thermo-mechanical pulping processes with multi-stage low consistency refining. *Journal of Process Control*, 2013, vol. 47, no. 23, pp. 1001–1015.
28. Novak Z., Kravanja Z. Mixed-integer nonlinear programming problem process synthesis under uncertainty by reduced dimensional stochastic optimization. *Industrial & engineering chemistry research*, 1999, vol. 38, no. 7, pp. 2680–2698.
29. Meshalkin V.P., Gimarov V.A., Zaitsevsky I.V. *Lokalne matematicheskie modeli dlya upravleniya promyshlennym predpriyatiyem* [Local mathematical models for industrial enterprise control]. Moscow, Izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury, 2003. 456 p.
30. Orazbayev B.B. *Metody modelirovaniya i prinyatiya resheniy dlya upravleniya proizvodstvom v nechetkoy srede* [Methods of modeling and decision making for production management in a fuzzy environment]. Astana, L.N. Gumilev Eurasian National University Publ., 2016. 398 p.
31. Méndez C.A., Cerdá J., Grossmann I.E., Harjunkoski I., Fahl M. State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. *Computers and Chemical Engineering*, 2006, no. 30, pp. 913–928.
32. Grossmann I.E. Challenges in the Application of Mathematical Programming in the Enterprise-wide Optimization of Process Industries. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2014, vol. 48, no. 5, pp. 500–517.
33. Shumsky V.M., Zyryanova L.A. *Inzhenernye zadachi v neftepererabotke i neftekhimii* [Engineering tasks in oil refining and petrochemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 457 p.

Received: 15 November 2018.

Information about the authors

Batyr B. Orazbayev, Dr. Sc, professor, L.N. Gumilev Eurasian National University.

Yerbol A. Ospanov, postgraduate student, L.N. Gumilev Eurasian National University.

Kulman N. Orazbayeva, Dr. Sc, professor, Kazakh University of Economics, Finance and International Trade.

Bulat A. Serimbetov, Cand. Sc., associate professor, Kazakh University of Economics, Finance and International Trade.

УДК 552.143

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ПРОДУКТИВНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВИКУЛОВСКОЙ СВИТЫ

Казанская Диана Андреевна¹,
trinity0077@mail.ru

Александров Вадим Михайлович^{1,2},
alexandrov_v@aotandem.ru

Белкина Валентина Александровна¹,
belkinava@tyuiu.ru

¹ Тюменский Индустриальный Университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

² АО «Тандем»,
Россия, г. Тюмень, ул. Республики, 57.

Актуальность. Задачи поисков, разведки, оценки ресурсов и запасов, проектирования, разработки решаются на основе геологических моделей. Наряду с тем, что современное геологическое моделирование позволяет получить трехмерное описание строения геологического объекта, изучить характер и изменчивость параметров пласта и насыщающих его флюидов, оно также позволяет оценить неопределенности, неизбежно возникающие при моделировании геологического строения пласта. Из этого следует, что точность решения любой геологической задачи в существенной степени определяется адекватностью трехмерной модели соответствующего объекта. Таким образом, появляется необходимость привлечения для построения моделей, кроме эмпирических данных, всех видов априорной и косвенной информации – в частности, концептуальной седиментологической модели.

Цель: усовершенствование методики построения трёхмерных геологических моделей, учитывающей особенности условий седиментации. Это обусловлено тем, что именно литофациальные характеристики продуктивных отложений являются основными факторами неоднородности природных резервуаров и нефтенасыщенности пород-коллекторов. Методика, учитывающая фациальное строение залежей, позволяет построить дискретно-непрерывную трехмерную модель, более адекватно описывающую изучаемый геологический объект и обладающую заметно более высокими прогностическими свойствами.

Объекты: продуктивные пласты викуловской свиты Ем-Еговского лицензионного участка.

Методы: детальная корреляция, усовершенствованная электрометрическая методика фациальной диагностики отложений, детерминистические и стохастические методы двумерного и трехмерного моделирования геологических параметров.

Результаты. По данным керна и материалов геофизических исследований скважин с использованием усовершенствованной методики В.С. Муромцева построена фациальная модель, включающая следующие группы фаций горизонта ВК, викуловской свиты: дальняя зона пляжа, переходная зона пляжа и предфронтальная зона пляжа. С учётом данных по вновь пробуренным 192 скважинам проведена детальная корреляция горизонта ВК. По её результатам внутри пласта ВК, выделено три седиментационных цикла, для которых характерна довольно хорошая выдержанность по площади. На основе более точных данных сейсмических и данных 192 вновь пробуренных скважин с использованием концептуальной модели обстановок седиментации создана уточнённая модель залежи горизонта ВК, Ем – Еговского месторождения. Согласно построенной модели, представления о геологическом строении залежи горизонта ВК, изменилось значимо. Внешняя проверка подтвердила более высокую точность, а значит, и более высокие прогностические свойства созданной геологической модели. Согласно уточнённому строению, уменьшилась площадь и нефтенасыщенные толщины залежи, и как следствие геологические запасы. Уточнение и детализация строения залежи горизонта ВК, позволит повысить эффективность доразведки слабо изученных частей и разработки. Предлагаемая в работе модель использована для создания гидродинамической модели и для обоснования наиболее эффективных геологических мероприятий.

Ключевые слова:

Данные сейсморазведки, данные керна, данные геофизических исследований скважин, корреляция пластов, концептуальная модель, геологическая модель, викуловская свита, месторождение.

Эффективность решения любой геологической задачи в существенной степени определяется адекватностью модели соответствующего используемого объекта. В связи с этим построение трехмерных геологических моделей (3D ГМ), учитывающих весь объем геолого-геофизической информации, неоднородной по качеству и масштабу и неравномерно распределенной по площади и разрезу, остается актуальной задачей [1]. Это означает, что при создании геологической модели (ГМ) в обязательном порядке должна использоваться не только

вся геолого-геофизическая и геолого-промысловая информация, но и все доступные виды косвенной и априорной информации. Использование косвенной информации требует статистического анализа различных параметров, как правило, целевых в решаемой задаче от различных наборов замеров [2]. Привлечение априорной информации для расчетов при создании ГМ возможно после формализации геологических закономерностей. И тем не менее, несмотря на достаточно большие объёмы различных видов информации, используемой при

построении ГМ, практически все геологические задачи являются некорректными, так как имеют бесчисленное множество решений [3, 4]. В этих условиях задача моделирования заключается в создании модели, в которой согласованы все виды информации, на которой она базируется, и описании по возможности различных неоднородностей. Отметим, что, как правило, именно неоднородности представляют большой интерес при решении большинства геологических задач [5]. Ну, и наконец, для контроля прогностических свойств моделей необходимо проводить внешнюю проверку.

Как показывает практический опыт, одним из важных видов косвенной информации является концептуальная модель изучаемого объекта. В настоящее время в литературе под концептуальной моделью однозначно понимаются две компоненты: седиментационная и тектоническая составляющие. В представленной работе изучается объект, на котором по материалам сейсмики уже создана тектоническая составляющая, поэтому в работе строится седиментационная компонента.

Объектом исследований в данной работе является важный продуктивный горизонт – викуловская свита Ем-Еговского ЛУ. Викуловская свита выделена в 1954 г. Н.Н. Ростовцевым по скважине в пос. Викулово Тюменской области [6, 7]. Изучение нефтегазового потенциала свиты начато по инициативе Ю.Н. Карагодина, и продуктивность впервые обоснована на керне из скважины Лорбинская № 35 около 50 лет назад [8]. Затем нефтеносность свиты подтвердилась данными по скважинам № 31 и 38.

Отложения викуловской свиты Красноленинского свода, обладая высокой продуктивностью, характеризуются сложным геологическим строением. При этом большое число залежей разбурены редкой сеткой скважин, причем зачастую крайне неравномерной, следствием чего является значимый недостаток эмпирической информации для построения адекватной трехмерной геологической модели.

С целью изучения генезиса отложений викуловской свиты проанализирован керновый материал по восьми скважинам, расположенным в различных участках Ем-Еговского месторождения (№ № 1891, 1895, 1917, 2548, 3665, 3682, 6647 и 30034Р). Выполнена классификация характерных форм каротажных диаграмм ГИС для продуктивных пластов [9, 10].

Схема мелководно-морских обстановок заимствована из работ Л.Н. Ботвинкиной, M.R. Lider, H.G. Reading, H.-E. Reineck и I.B. Singh, R.C. Selley [11–15]. В соответствии с этой схемой выделяются фации дальней, переходной и предфронтальной зон пляжа и собственно пляж (нижний и верхний).

С помощью электрометрической методики В.С. Муромцева, используя результаты исследований кернового материала и данные ГИС, в пределах месторождения выделены следующие группы

фаций в пласте ВК₁ викуловской свиты: *дальняя зона пляжа, переходная зона пляжа и предфронтальная зона*. Линия предфронтальной зоны пляжа проведена условно и не использовалась при трехмерном геологическом моделировании ввиду малого объема исходной информации. Анализ форм диаграммы ПС, ГК и ИК позволил определить типовые модели перечисленных ГИС и провести классификацию фаций по характерным формам каротажных диаграмм.

Отложения *дальней зоны пляжа* формируются ниже уровня штормовых волн. Данные отложения представлены градиционно-слоистым переслаиванием пород от аргиллитов до алевролитов и тонкозернистых песчаников (рис. 1).

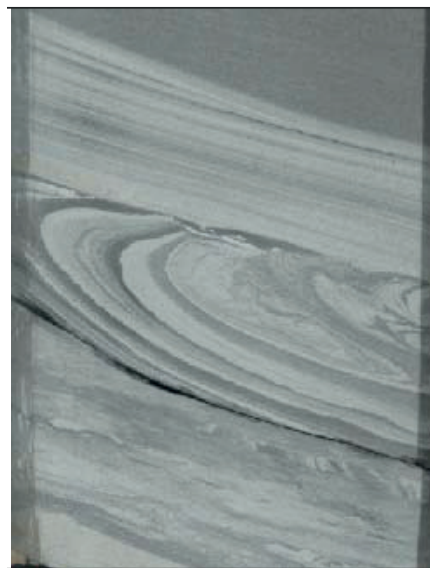


Рис. 1. Переслаивание градиционное аргиллита и песчаника тонкозернистого алевролитового. Ем-Еговская площадь, скв. 3682, горизонт ВК₁, инт. 1471,10–1471,25 м

Fig. 1. Intercalation gradation of mudstone and sandstone fine-grained aleurite. Em-Egovskaya area, well 3682, horizon VK₁, int. 1471,10–1471,25 m

Электрометрическая модель фации дальней зоны пляжа в формализованном виде представляет собой аномалию ПС в форме треугольника, расположенную в зоне отрицательных отклонений диаграммы. Кровельная линия ПС наклонная, чаще всего зубчатая или рассеченная, но может быть и прямой. Подошвенная линия также наклонная зубчатая, рассеченная или прямая. Значение $\alpha_{ПС}$ достигает 0,8–0,6 д. ед. Кровельная линия ИК наклонная волнистая, боковая и подошвенная – наклонные, волнистые. Кровельная линия ГК зубчатая наклонная, боковая – зубчатая или рассеченная, подошвенная линия также наклонная зубчатая или рассеченная. Типовая электрометрическая модель этой субфации представлена на рис. 2. Желтым цветом выделен коллектор.

Переходная зона представлена чередованием глинисто-алевролитовых и песчаных прослоев в отложениях и характеризуется чередованием

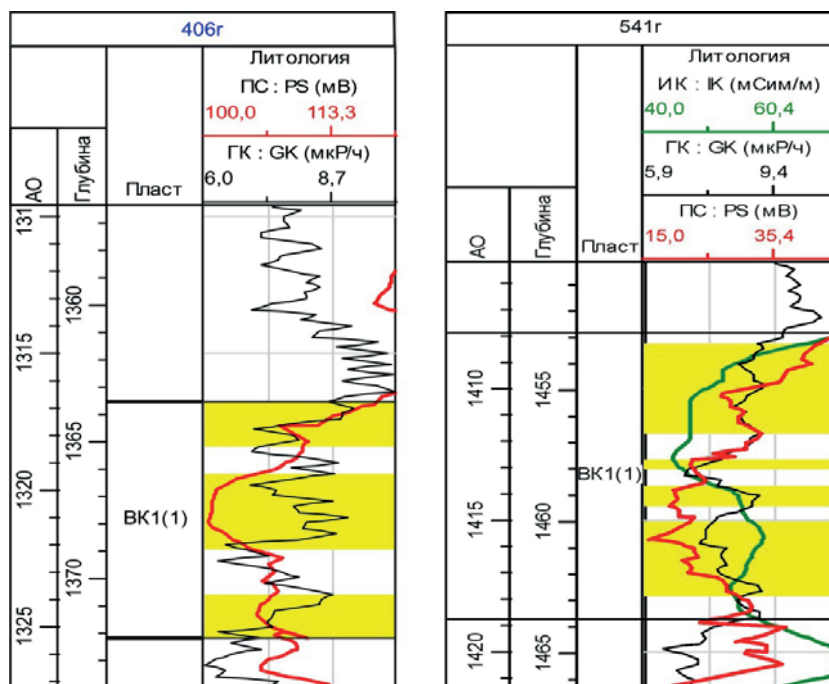


Рис. 2. Типовая электрометрическая модель отложений фации дальней зоны пляжа

Fig. 2. Typical electrometric model of the far-field facies deposits

условий высокой и низкой энергии волн, так как находится между средними базисами штормовых и спокойных волн. Текстуры продуцируются штормами (рис. 3).



Рис. 3. Деформационная текстура, развитая во время отложения алевритопесчаного осадка. Ем-Еговская площадь, скв. 30034Р, горизонт ВК₁, инт. 1496,65–1496,80 м

Fig. 3. Texture of cosedimentation deformation, developed during deposition of aleurite sand sediment (convoluted stratification, possibly slipping). Em-Egovskaya area, well 30034P, horizon ВК₁, int. 1496,65–1496,80 m

Электрометрическая модель фации переходной зоны представляет собой неравнобедренную трапе-

цию, расположенную в зоне отрицательных отклонений диаграммы ПС ($\alpha_{ПС}$ 0,4 д. ед.). Кровельные линии моделей ГК и ИК наклонные прямые, боковые – зубчатые, подошвенные – наклонные волнистые. Ширина аномалии достигает единиц, иногда десятков метров. Типовая электрометрическая и модели ГК и ИК этой субфации представлены на рис. 4.

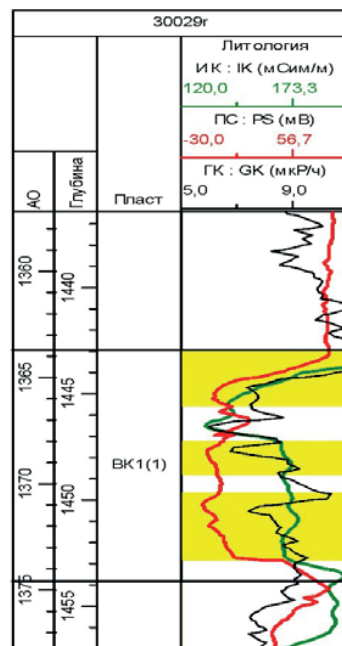


Рис. 4. Типовая электрометрическая модель отложений фации переходной зоны пляжа

Fig. 4. Typical electrometric model of transition beach area sediment

Геологические и фильтрационно-ёмкостные характеристики викуловской свиты в пределах Ем-Еговского месторождения приведены в табл. 1, где через $H_{эф}$ обозначена эффективная толщина, $K_{пес}$ – коэффициент песчаности, $K_{п}$ – коэффициент открытой пористости, $K_{пр}$ – коэффициент проницаемости, $K_{нн}$ – коэффициент начальной нефтенасыщенности. Из анализа данных таблицы видно, что породы пласта наиболее значимо изменчивы по $K_{пр}$ и $K_{п}$.

Таблица 1. Геологические характеристики викуловской свиты Ем-Еговского месторождения

Table 1. Geological characteristic of vikulovskaya suits of Em-Egovskoe field

Статистическая характеристика Statistical characteristic	$H_{эф}$ H_{ef}	$H_{эф,нн}$ $H_{ef,os}$	$K_{пес}$ K_{sand}	$K_{п}$ K_{por}	$K_{нн}$ K_{oil}	$K_{пр}$ $n \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$
	м/м		д. ед./u.s.			K_{perm} $n \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$
Наименьшее/Least	4,7	0,58	0,29	0,247	0,205	6,93
Наибольшее/Most	36,3	33,3	0,83	0,301	0,613	56,109
Среднее значение/Mean	14,1	13,3	0,52	0,280	0,482	26,1
Дисперсия/Dispersion	2,64	23,3	0,006	0,005	0,003	68,4
Стандартное отклонение Standard deviaton	1,62	4,82	0,08	0,07	0,05	8,27
Коэффициент вариации Variation coefficient, %	15,9	2,76	14,9	25,3	12,7	29,3
Объём выборки Sample size	1250	1250	1250	1250	1250	1250

На карту седиментационных обстановок нанесены начальные дебиты (добыча за первый месяц эксплуатации скважины) по скважинам, а статистические характеристики этих дебитов приведены в табл. 2. Из анализа карты видно, что переходная зона пляжа в целом характеризуется большими дебитами относительно дальней зоны (рис. 5, табл. 2) и, как показывает коэффициент вариации, заметно более выдержанными.

Таблица 2. Статистические характеристики начальных дебитов скважин по фациальным зонам. Горизонт ВК₁ Ем-Еговского месторождения

Table 2. Statistical characteristic of initial debit of sedimental areas. Horizon VK₁ of Em-Egovskoe field

Статистическая характеристика Statistical characteristic	Начальный дебит нефти, т/сут Initial oil production rate, t/day	
	Дальняя зона пляжа Far beach area	Переходная зона пляжа Transition beach area
Наименьшее/Least	7,0	20,0
Наибольшее/Most	827,0	1347,0
Среднее значение/Mean	300,7	886,0
Дисперсия/стандартное отклонение Dispersion/Standard deviation	42329,7/205,7	170339,2/412,7
Коэффициент вариации Variation coefficient	68,5	46,5
Объём выборки/Sample size	405	179

Сравнение геологических и фильтрационно-ёмкостных характеристик обоснованных фаций дают данные табл. 3, которые показывают, что переход-

ная зона пляжа характеризуется заметно большими значениями $H_{эф,нн}$ и $K_{пр}$, причем изменчивость эффективных нефтенасыщенных толщин заметно меньше.

Для дальнейшего изучения геологического строения отложений Викуловской свиты Ем-Еговского месторождения построена трехмерная геологическая модель её продуктивных отложений с помощью программного комплекса «Igar RMS 2013.1.2» компании «Rohar» («Emerson group of companies») согласно РД 153–39.0–047–00 [16, 17].

Начальным этапом создания 3D ГМ является построение структурного каркаса. Основные части структурного каркаса модели – стратиграфические поверхности пластов и границы пластов в скважинах.

Размер участка для моделирования выбран в соответствии с предполагаемыми контурами нефтеносности, а также расположением краевых скважин [18]. Область геологического моделирования охватывает Ем-Еговский ЛУ с расширением границ на 2 км. Размер участка моделирования составляет около 49×45 км, общая толщина отложений достигает порядка 95 м.

При трехмерном моделировании использованы данные по 1322 скважинам, в том числе: по 116 разведочным и по 1206 эксплуатационным. В период с 2008–2014 гг. пробурено ещё 5 разведочных, 15 горизонтальных, 25 боковых стволов и 147 эксплуатационных скважин. Данные по новым скважинам также использованы при построении 3D ГМ.

Для построения структурного каркаса в качестве тренда используется структурная (стратиграфическая) поверхность отражающего горизонта «М1», полученная по данным 3D сейсморазведки и не использованная в предыдущих моделях. Этот ОГ хорошо выдержан по всей площади и отождествляется кровлей горизонта ВК₁ (рис. 6).

Для более корректного моделирования условий осадконакопления в продуктивной толще викуловских отложений выделены и прослежены горизонты ВК₃, ВК₂ и ВК₁, объединенные в один подсчетный объект ВК₁₋₃.

Горизонт ВК₁ приурочен к кровельной части викуловской свиты. Кровля пласта однозначно выделяется в разрезе по комплексу методов ПС, ИК, ГК, БК. Расчлененность пласта равномерная, пропластки глин и песчаников следятся довольно уверенно на протяженных участках площади.

Строение горизонтов ВК₂, ВК₃ – это ритмичное переслаивание мелкозернистых песчаников и алевролитов, чередующееся с прослоями и линзами глинистых алевролитов и глин. Внутри горизонта ВК₁ выделено три седиментационных цикла, для которых характерна довольно хорошая выдержанность по площади. В кровле третьего цикла практически во всех скважинах уверенно выделяется уплотненный известковый пропласток. Выделенные горизонты являются устойчивыми единицами разреза, хорошо выделяются на диаграммах ПС,

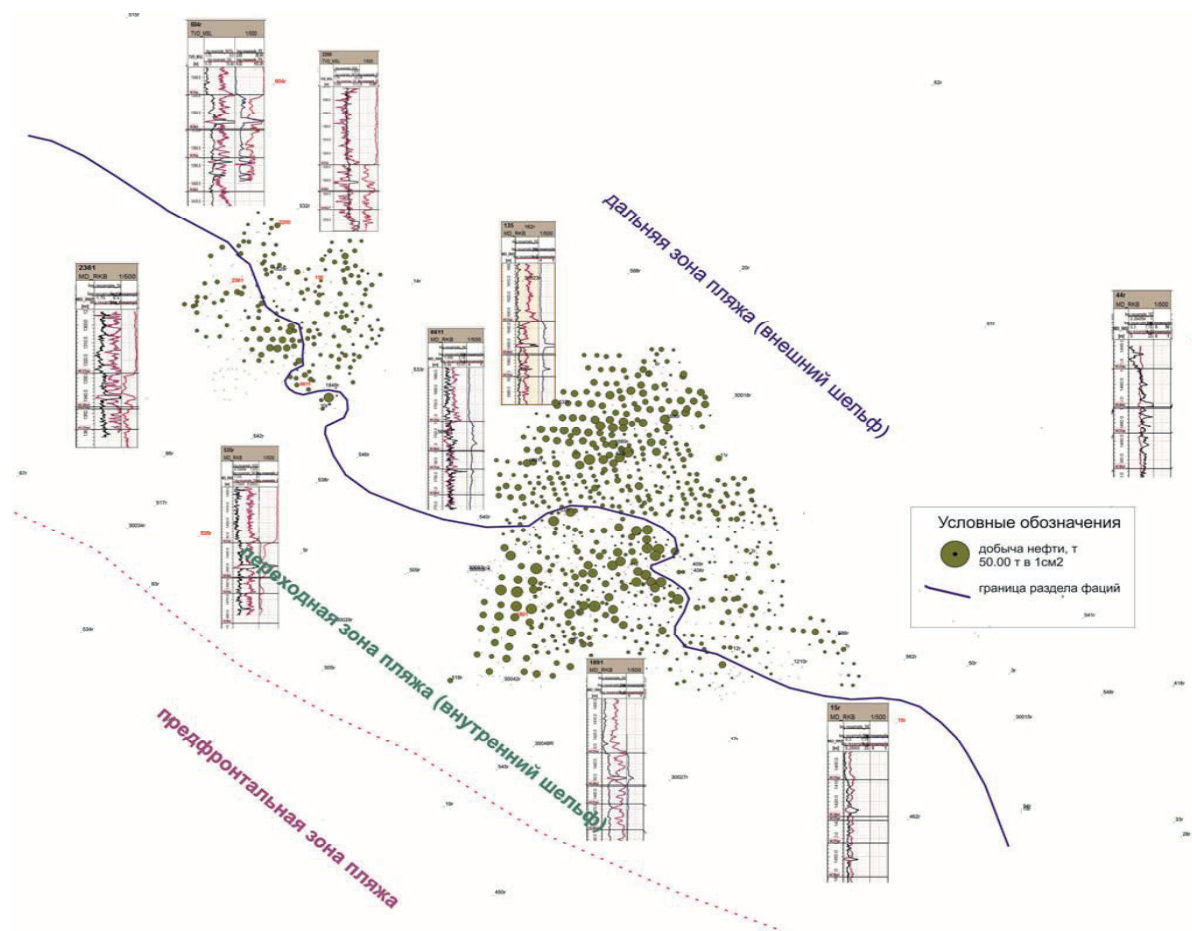


Рис. 5. Седиментационные обстановки накопления осадков пласта ВК₁ викуловской свиты Ем-Еговского месторождения

Fig. 5. Sedimentation conditions of sediment accumulation of VK₁ vikulovskaya suit of Em-egovskoe field

Таблица 3. Геологические характеристики горизонта ВК₁ викуловской свиты Ем-Еговского месторождения по зонам седиментации (1 – дальняя зона пляжа, 2 – переходная зона пляжа)

Table 3. Geological characteristics of the horizon VK₁ of vikulovskaya suite in Em-Egovskoe field on sedimentation areas (1 – the beach area, 2 – the transition beach area)

Статистическая характеристика Statistical characteristic	Н _{эф} , м H _{ef} , m		Н _{эф.лн} , м H _{ef.os} , m		K _{пес} , д. ед. K _{sand} , u.s.		K _п , д. ед. K _{por} , u.s.		K _{пр} , n*10 ⁻³ мкм ² K _{perm} , n*10 ⁻³ μm ²		K _{инн} , д. ед. K _{oil} , u.s.	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Наименьшее/Least	4,7	5,8	0,58	0,59	0,32	0,29	0,250	0,247	10,620	6,930	0,205	0,326
Наибольшее/Most	22,1	36,3	33,3	24,95	0,83	0,90	0,297	0,301	43,864	56,109	0,613	0,588
Среднее значение/Mean	14,2	15,2	13,3	13,2	0,52	0,51	0,280	0,281	25,837	26,952	0,475	0,497
Дисперсия/стандартное отклонение Dispersion/Standard deviation	8,4/ 2,7	11,5/ 3,4	27,2/ 5,2	16,9/ 4,1	0,004/ 0,067	0,006/ 0,077	0,0004/ 0,006	0,0005/ 0,008	41,578/ 6,448	50,099/ 7,078	0,003/ 0,050	0,002/ 0,049
Коэффициент вариации, % Variation coefficient, %	19	22	39,2	31,1	13	15	21	28	25	26,2	10,5	9,9
Объём выборки/Sample size	794	456	794	456	794	456	794	456	794	456	794	456

ГК, ИК, БК; довольно легко поддаются типизации, уверенно прослеживаются и сопоставляются по площади. На рис. 7 приведена схема детальной корреляции продуктивных горизонтов викуловской толщи на площади Ем-Еговского ЛУ.

Геологические характеристики выделенных седиментационных циклов приведены в табл. 4. Из

приведенных данных следует, что геобъект ВК₂, как показывают коэффициенты вариации, обладает наибольшей латеральной неоднородностью по параметрам K_{пр}, Н_{эф}, Н_{эф.лн} и K_{пес}, а геобъект ВК₁ – наибольшими значениями эффективных и эффективных нефтенасыщенных толщин и коэффициента нефтенасыщенности.

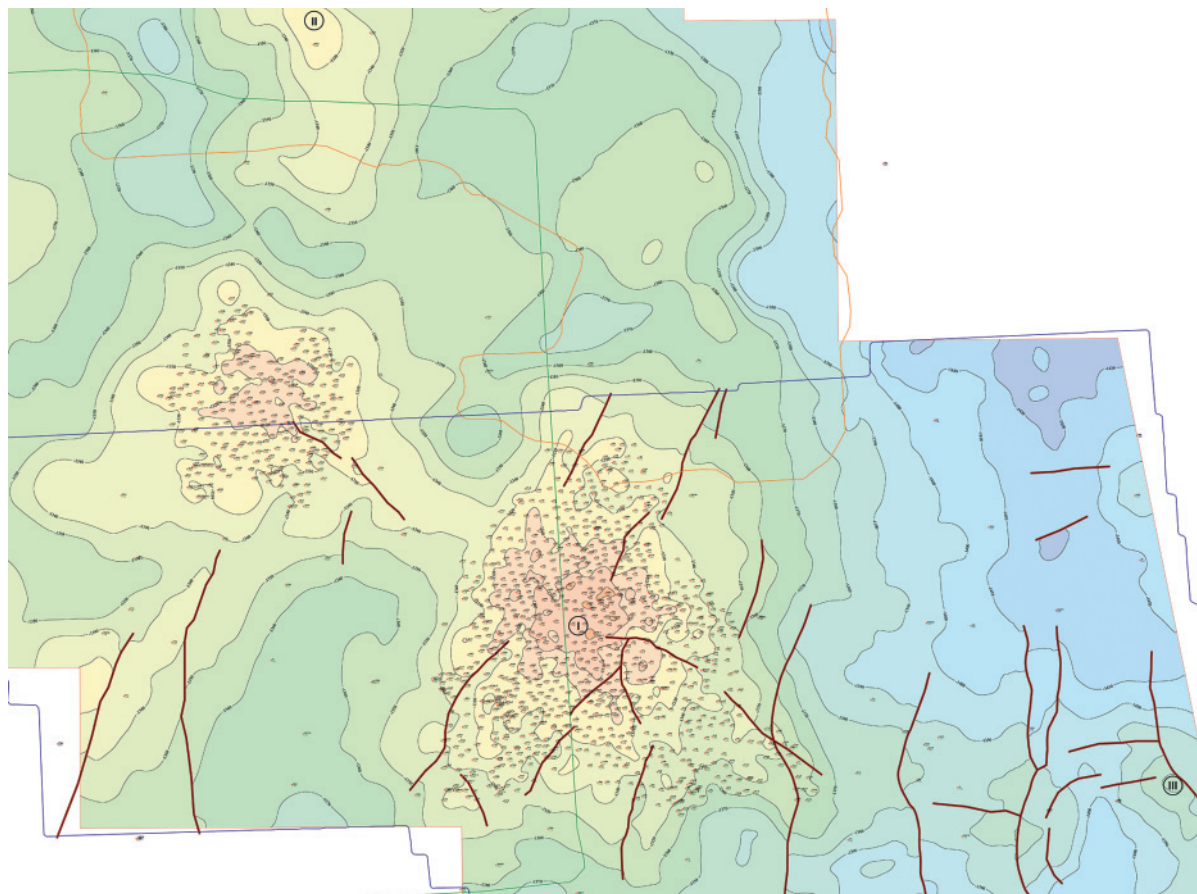


Рис. 6. Структурная карта по кровле отражающего горизонта «M1» (кровля горизонта ВК₁)

Fig. 6. Structural top map of the reflecting horizon «M1» (VK₁ horizon top)

Таблица 4. Геологические характеристики викуловской свиты Ем-Еговского месторождения по седиментационным циклам ВК₁, ВК₂, ВК₃
Table 4. Geological characteristics of the vikulovskaya formation of the Em-Egovskoye deposit according to sedimentation cycles VK₁, VK₂, VK₃

Статистическая характеристика Statistical characteristic	Н _{эф} , м H _{ef} , m			К _{пес} , д. ед. K _{sand} , u.s.			К _п , д. ед. K _{por} , u.s.			К _{др} , n*10 ⁻³ мкм ² K _{perm} , n*10 ⁻³ μm ²			К _{ни} , д. ед. S _{oil} , u.s.		
	ВК ₁	ВК ₂	ВК ₃	ВК ₁	ВК ₂	ВК ₃	ВК ₁	ВК ₂	ВК ₃	ВК ₁	ВК ₂	ВК ₃	ВК ₁	ВК ₂	ВК ₃
Наименьшее/Min	4,7	2,0	2,1	0,29	0,14	0,25	0,235	0,235	0,236	6,93	4,4	6,4	0,205	0,054	0,015
Наибольшее/Max	36,6	13,3	13,0	0,9	0,93	0,71	0,301	0,301	0,305	56,11	69,4	69,4	0,747	0,781	0,762
Среднее значение/Mean	14,2	6,1	9,3	0,52	0,49	0,54	0,280	0,277	0,278	25,84	24,24	25,5	0,61	0,411	0,331
Дисперсия/стандартное отклонение Dispersion/Standard deviation	2,6/ 1,62	1,7/ 1,3	2,7/ 1,6	0,006/ 0,077	0,009/ 0,095	0,007/ 0,082	0,00005/ 0,008	0,000006/ 0,008	0,00007/ 0,082	68,3/ 8,3	70,6/ 8,4	63,8/ 7,99	0,002/ 0,05	0,01/ 0,11	0,01/ 0,1
Коэффициент вариации, % Variation coefficient	11,4	21,3	17,2	14,9	19,4	15,2	2,7	2,9	29,5	29,3	34,7	31,3	7,5	26,7	30,2
Объем выборки/Sample size	1250	1027	223	1250	1250	223	1250	1250	223	1250	1250	223	1250	1250	214

Структурные карты по кровлям горизонтов строились методом схождения от кровли пласта ВК₁. Структурная модель включает пять структурных поверхностей (4 зоны) и 21 поверхность тектонических нарушений. Каждый горизонт моделировался как самостоятельная зона для достижения детальности модели и отражения стратифицированности викуловских отложений.

Проведен контроль качества построенных структурных поверхностей относительно страти-

графических отметок горизонтов – невязки значений абсолютных отметок стратиграфических границ в точках скважин не превышают ±0,2 м. Это говорит об адекватности структурного каркаса.

Интерпретация сейсмического материала и данные бурения позволили уточнить геологическое строение данного участка (структурный план, модель тектонических нарушений). За счет использования новых данных уточнилась площадь залежи – на западе залежи наблюдается незначи-

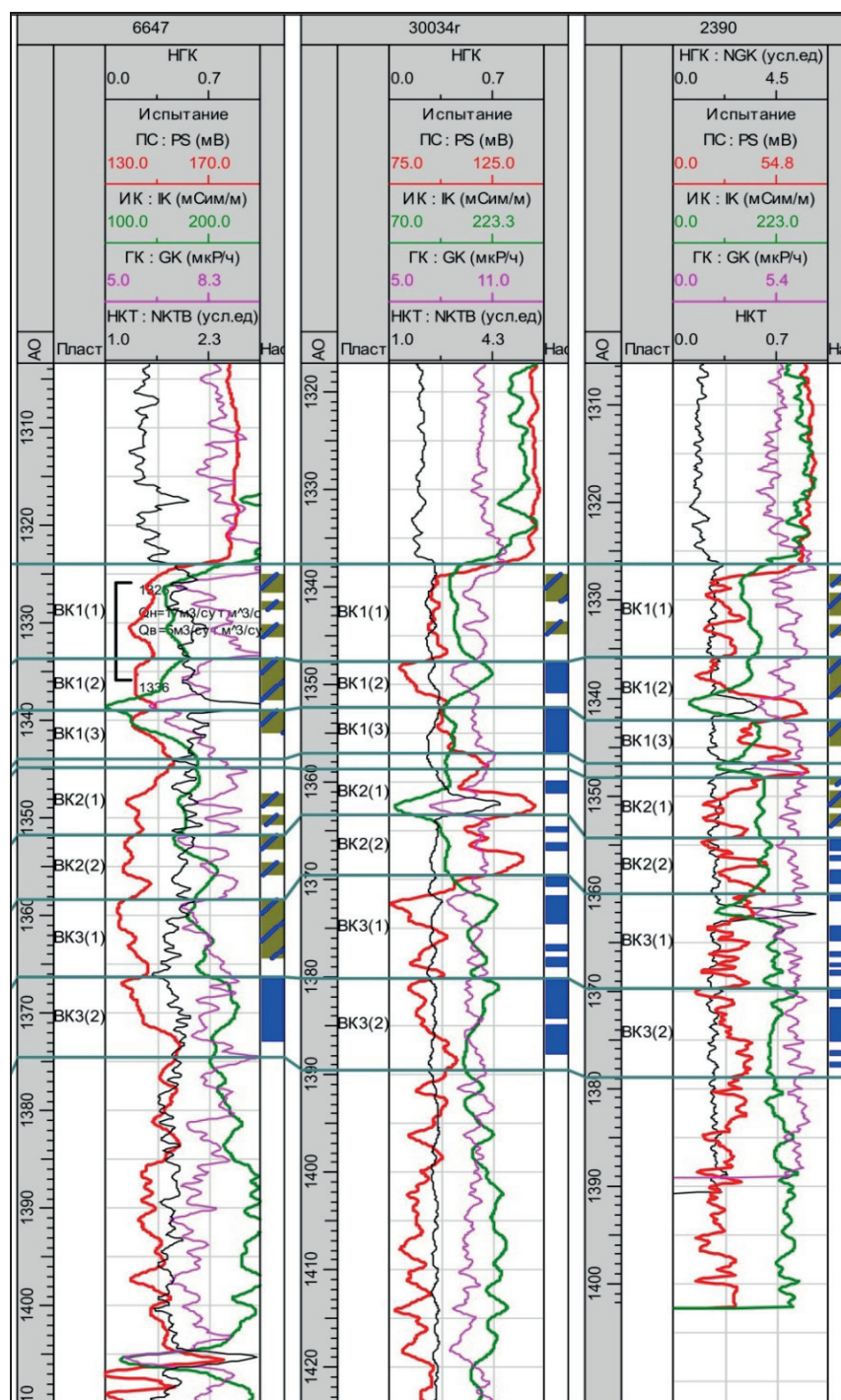


Рис. 7. Схема детальной корреляции продуктивных горизонтов VK_3 , VK_2 и VK_1 викуловской свиты, Ем-Еговское месторождение

Fig. 7. Scheme of detailed correlation of productive horizons VK_3 , VK_2 and VK_1 vikulovskaya suite, Em-Egovskoe deposit

тельный прирост, в то время как на севере, северо-востоке и юго-востоке залежи происходит списание нефтенасыщенной части.

Трёхмерная сетка построена в стратиграфических границах структурного каркаса. Шаг сетки по горизонтали – 50×50 м – принят, исходя из среднего расстояния между скважинами (150–250 м) [19, 20]. Из расчета 3D грида исключе-

ны 31 скважина, по причине нахождения стволов в одной ячейке, а также 74 скважины по причине отсутствия РИГИС. Для всех пластов применялась пропорциональная схема напластования, в связи с отсутствием, согласно построенной седиментационной модели, размывов и перерывов в осадконакоплении. Параметры трехмерной сетки приведены в табл. 5.

Таблица 5. Геометрические характеристики трехмерной сетки модели викуловской свиты

Table 5. Geometric characteristics of the three-dimensional grid of the model of the Vikulovskaya suite

Горизонт Horizon	Количество слоев Number of layers	Толщина слоя, м Thickness layers, m			Количество ячеек Number of cells
		наименьшая least	наибольшая most	средняя mean	
BK ₁	67	0,23	0,39	0,30	46 627 176
BK ₂	46	0,20	0,49	0,30	32 012 688
BK ₃	61	0,12	0,46	0,30	42 451 608

Построение 3D модели литологии реализовано поэтапно:

- 1) построение двумерных трендов – карт песчанистости ($k_{\text{пес}}$) – по скважинным данным отдельно по зонам седиментации (рис. 2) для горизонта BK₁, и карт $k_{\text{пес}}$, построенных отдельно для горизонтов BK₂ и BK₃.

Карта $k_{\text{пес}}$ для горизонта BK₁ строилась для каждой зоны седиментации внутри заданного полигона, затем «сшивалась» со сглаживанием в зонах границ фаций (рис. 8). Из рис. 8 видно, что 2D модель песчанистости является гладкой функцией не только в зонах выделенных фаций, но и на их границе. Переходная зона пляжа характеризуется локальными изменениями песчанистости по скважинам в отличие от предфронтальной зоны пляжа.

- 2) построение одномерных трендов – ГСР параметра литологии – отдельно по зонам седиментации – дальняя зона пляжа и переходная зона пляжа горизонта BK₁ и ГСР для горизонтов BK₂ и BK₃ отдельно (рис. 9).

Необходимость построения четырех одномерных и четырех двумерных трендов обусловлена концептуальной геологической моделью.

Предфронтальная зона пляжа проведена условно и не использовалась при построении 3D ГМ, так как проходит на границе ЛУ и недостаток информации данного участка не позволяет корректно построить выделенную зону.

- 3) построение комбинированной трендовой 3D модели литологии ($K_{\text{пес}}^{\text{тр}}$) по построенным трендам ГСР и $k_{\text{пес}}$. В результате получена трендовая 3D модель коэффициента песчанистости, в которой для пласта BK₁ в каждой зоне седиментации использовался свой ГСР и карта $k_{\text{пес}}$, а также свой ГСР и карта $k_{\text{пес}}$ для горизонтов BK₂ и BK₃.
- 4) интерполяция значений коэффициента песчанистости в данных РИГИС с использованием трёхмерного тренда $K_{\text{пес}}^{\text{тр}}$.
- 5) дискретизация непрерывной 3D модели песчанистости по граничному значению – 0,5 д. ед., результатом чего явилась 3D модель литологии ($K_{\text{лит}}$).

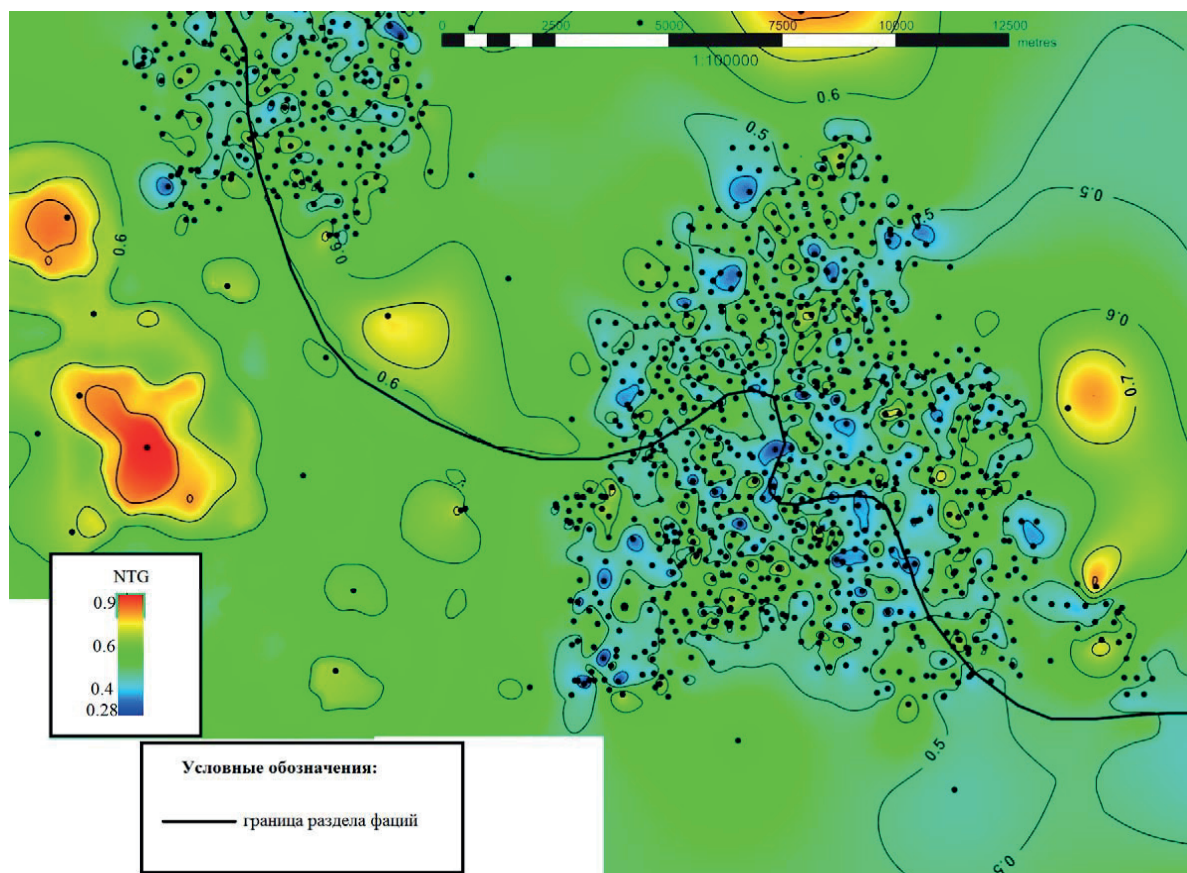


Рис. 8. Трендовая карта коэффициента песчанистости горизонта BK₁

Fig. 8. Trend map of the sand coefficient of horizon BK₁

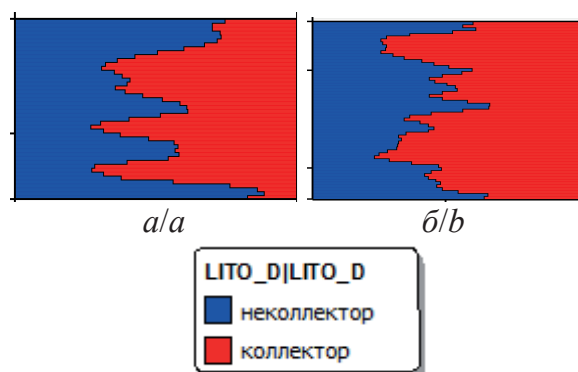


Рис. 9. ГСР параметра литологии по зонам седиментации: а) горизонт BK_2 , б) горизонт BK_3

Fig. 9. GSR of lithology parameter by sedimentation zones: а) horizon BK_2 , б) horizon BK_3

Корректность построенной литологической модели проверена использованием статистического анализа, сопоставлением двумерных карт эффективных толщин и песчанистости пластов, построенных на основе исходных данных и результирующих по модели 3D. На рис. 10 приведены средние параметры по геологической модели и по данным интерпретации ГИС. Графики ГСР и названные карты различаются незначимо, что свидетельствует об адекватном отражении неоднородности разреза и о внутренней сходимости всех разнородных и разноточных данных, использованных при построении трёхмерной геологической модели.

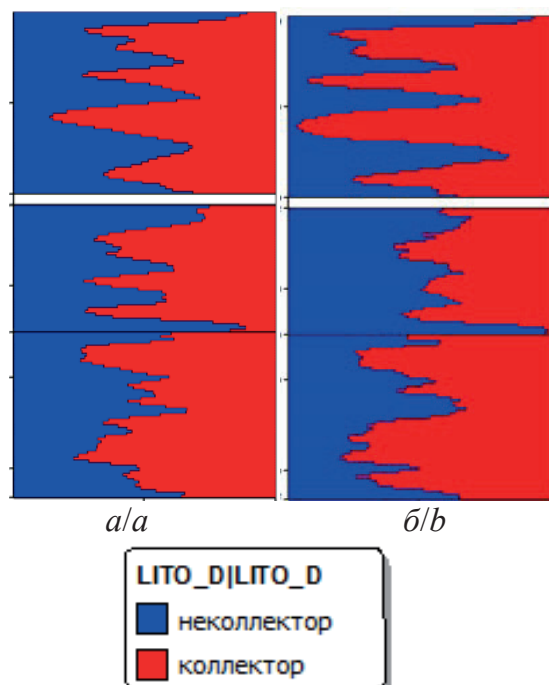


Рис. 10. Сопоставление ГСР по 3D модели литологии и BW. Викуловская свита (горизонты BK_1 , BK_2 , BK_3) а) осредненные скважинные данные, б) куб литологии

Fig. 10. Comparison of GSR for the 3D model of lithology and BW. Vikulovskaya suite (horizons BK_1 , BK_2 , BK_3) а) BW, б) cube of lithology

Интерполяция коэффициента открытой пористости ($K_{п}$) на трехмерную сетку осуществлена алгоритмом «Kriging» с использованием двумерных трендов – трех карт коэффициента открытой пористости по каждому пласту. Карты $K_{п}$ для группы пластов ВК строились для каждой зоны седиментации внутри заданного полигона, затем «сшивались» со сглаживанием в зоне границ фаций. Для каждой зоны (дальняя зона пляжа и переходная зона пляжа) при построении 3D куба $K_{п}$ задавались свои граничные значения пористости (минимальное и максимальное значение, табл. 5). На рис. 11 изображена карта коэффициента открытой пористости группы пластов ВК, полученная по результатам 3D моделирования. По данной карте можно сделать вывод о том, что переходная зона пляжа характеризуется более высокими значениями пористости по скважинам в отличие от предфронтальной зоны пляжа.

Интерполяция коэффициента нефтенасыщенности ($K_{нф}$) на трехмерную сетку осуществлена алгоритмом «Kriging» для ячеек-коллекторов выше поверхности ВНК. Интерполяция $K_{нф}$ осуществлялась для всей модели сразу, т. к. объект BK_{1-3} имеет общий ВНК. Для дальней зоны пляжа и переходной зоны пляжа при построении 3D куба $K_{нф}$ аналогично построению куба пористости задавались свои граничные значения начальной нефтенасыщенности (минимальное и максимальное значение, табл. 5).

Куб проницаемости $K_{пр}$ получен по петрофизической зависимости от куба пористости: $LgK_{пр} = 0,1937 * K_{п} - 4,0677$.

Проведена внешняя проверка качества построенной модели. На рис. 12 приведен график зависимости начального дебита (добыча за первый месяц эксплуатации скважины) нефти (q_n) от эффективной нефтенасыщенной ($h_{эф,нф}$) толщины. Из графика видно, что наблюдается тесная зависимость изменения q_n от $h_{эф,нф}$, что говорит о неплохой внешней сходимости. Коэффициент детерминации составляет 0,75.

Относительно начальных геологических запасов, числящихся на государственном балансе и утвержденных в 2004 г., списание нефти составило порядка 17 %. На изменение запасов повлияло, прежде всего, уменьшение площади залежи на 25 %. Площадь залежи уточнилась за счет использования новых данных 3D сейсмики. Также изменение запасов обусловлено уменьшением нефтенасыщенных толщин до 30 %.

Незначительные изменения таких подсчетных параметров, как пористость и нефтенасыщенность, объясняется возросшей изученностью месторождения. В 2008–2014 гг. пробурено 5 разведочных, 15 горизонтальных, 25 боковых ствола и 147 эксплуатационных скважин. В 2007–2008 гг. в юго-западной части ЛУ проведены 3D сейсморазведочные работы. Интерпретация сейсмического материала и данные бурения позволили уточнить геологическое строение данного участка (структурный план и модель тектонических нарушений).

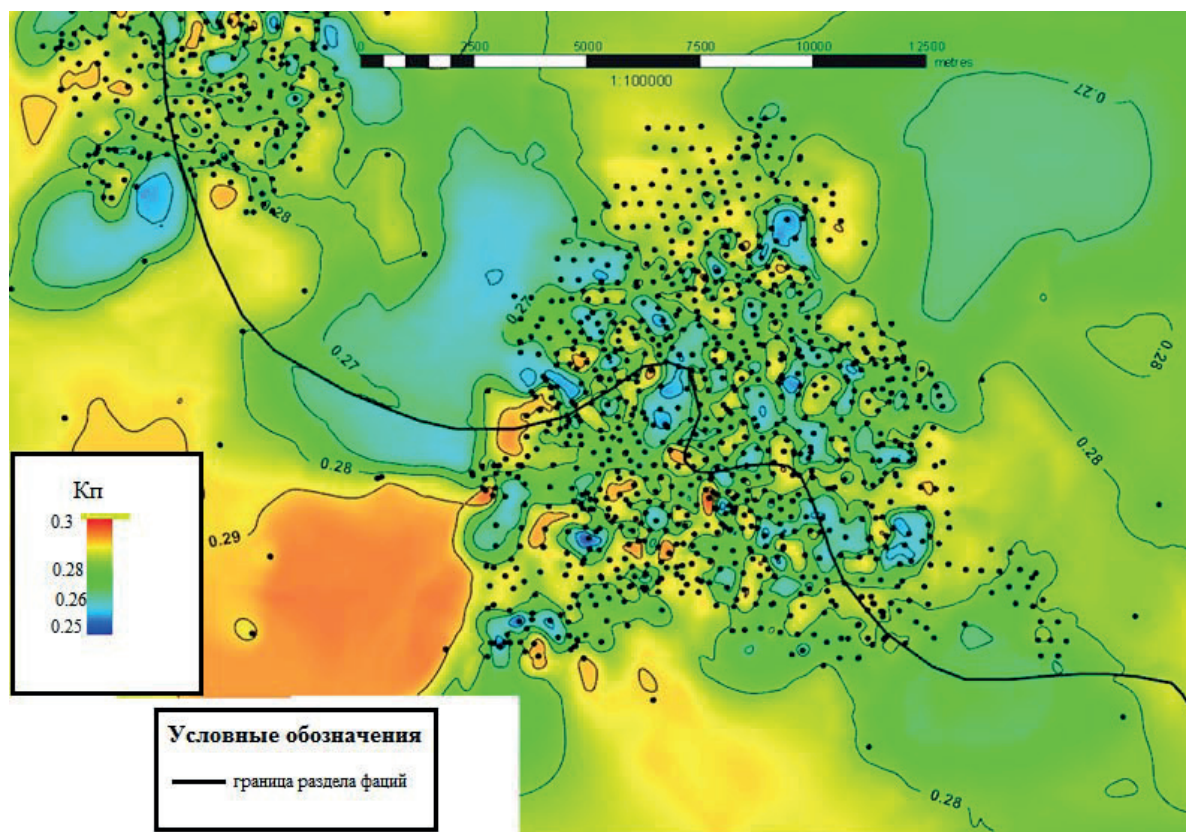


Рис. 11. Карта коэффициента пористости горизонта VK_1 по трехмерной геологической модели

Fig. 11. Map of the porosity coefficient of VK_1 horizon by the three-dimensional geological model

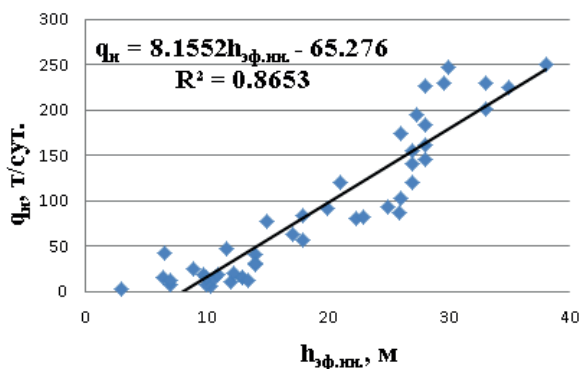


Рис. 12. Зависимость начального дебита нефти от эффективной нефтенасыщенной толщины. Викуловская свита Ем-Еговского месторождения

Fig. 12. Dependence of the initial oil production rate on the effective oil-saturated thickness. Vikulovskaya formation of the Em-Egovskoe field

Геологические запасы нефти и газа подсчитаны объемным методом, используя следующие подсчетные параметры: эффективный объем ячеек, коэффициенты пористости и нефтенасыщенности, пересчетный коэффициент и плотность нефти.

На дальнюю зону пляжа приходится 66 % общих запасов, на переходную – 34 %.

Выводы

1. По особенностям условий формирования отложений викуловской свиты горизонт VK_1 в пределах Ем-Еговского месторождения можно разделить на три основные генетические зоны: дальняя зона пляжа, переходная зона пляжа и предфронтальная зона пляжа.
2. Горизонт VK_1 приурочен к кровельной части викуловской свиты. Внутри горизонта VK_1 выделено три седиментационных цикла, для которых характерна довольно хорошая выдержанность по площади.
3. Авторская концептуальная геологическая модель викуловской свиты на территории Ем-Еговского месторождения, а также расчленение горизонта VK_1 на три пласта использовано при трехмерном геологическом моделировании.
4. При построении 3D модели литологии в качестве трендов в соответствии с построенной концептуальной моделью для горизонта VK_1 использованы геолого-статистические разрезы (ГСР) по двум фациальным зонам моделируемой. Трендовые карты коэффициента песчаности построены с учетом этих зон. Для каждого из горизонтов VK_2 и VK_3 построен свой ГСР и трендовые карты песчаности. Анало-

- гично, при построении трехмерной модели пористости использованы трендовые карты пористости, построенные по фациям.
5. В связи с привлечением новых данных изменилась геометрия залежи. Согласно новым сейсмическим данным и дополнительным материалам по вновь пробуренным 192 скважинам, и заметного уточнения трехмерной геологической модели, площадь нефтеносности уменьшилась на 25 % от ранее представляемой.
 6. Проведена оценка качества построенной трехмерной геологической модели – внутренняя проверка на сходимость всего объема разнородной и разноточной информации – сравнение гистограмм по данным скважин и данным 3D кубов.
 7. Качество 3D модели подтверждается результатами внешней проверки, сопоставлением начальных дебитов нефти с эффективными нефтенасыщенными толщинами, коэффициент деформации зависимости равен 0,75.
 8. Геологические запасы нефти посчитаны в целом и отдельно по зонам седиментации: на дальнюю зону пляжа приходится 66 % начальных геологических запасов, на переходную – 34 %. Отметим, что по зонам седиментации и первоначальные дебиты различаются значимо.
 9. Построена дискретно-непрерывная модель, обладающая более высокими прогностическими свойствами.
 10. Построенная трёхмерная геологическая модель продуктивного горизонта ВК₁ викуловской свиты Ем-Еговского лицензионного участка использована при гидродинамическом моделировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забоева А.А. Разработка методик трехмерного геомоделирования в условиях неоднородности и неравномерности геолого-геофизической информации (на примере месторождений Западной Сибири): дис. ... канд. геол.-минерал. Наук. – Тюмень, 2012. – 167 с.
2. Deutsch C.V. Geostatistical reservoir modeling. – New York: Oxford University Press, 2002. – 376 p.
3. Основы геологического моделирования (Ч. 1) / В.А. Белкина, С.Р. Бембель, А.А. Забоева, Н.В. Санькова. – Тюмень: Тюменский Государственный Нефтегазовый Университет, 2015. – 168 с.
4. Martin R., Boisvert J.B. Towards justifying unsupervised stationary decisions geostatistical modeling: Ensemble spatial and multivariate clustering with geomodeling specific clustering metrics // Computers & Geosciences. – 2018. – V. 120. – P. 82–96.
5. Stochastic Modeling and Geostatistics. Principles, Methods, and Case Studies (AAPG Computer Applications in Geology, No. 3) / Ed. by J.M. Yarus, R.L. Chambers. – Tulsa, Oklahoma: AAPG, 1994. – 379 p.
6. Ростовцев Н.Н. Стратиграфический словарь мезозойских и кайнозойских отложений Западно-сибирской низменности. – Л.: Недра, 1978. – 183 с.
7. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Западно-Сибирской низменности / под общей ред. Н.Н. Ростовцева. – М.: Госгеолотехиздат, 1958. – 391с.
8. Карагодин Ю.Н. Нефть и газ викуловской свиты // Наука в Сибири. Издание СО РАН. – 2008. – № 41. – С. 10–13.
9. Александров А.А., Белкина В.А., Казанская Д.А. Генетическая классификация темпеститов // Территория Нефтегаз. – 2014. – № 6. – С. 40–43.
10. Александров А.А., Белкина В.А., Казанская Д.А. Особенности геологического строения темпеститов в отложениях викуловской свиты // Нефть и газ. – 2015. – № 5. – С. 10–15.
11. Обстановки осадконакопления и фации: В 2-х т. Т. 1 / Х.Г. Реддинг, Дж.Д. Коллинсон, Ф.А. Аллен, Т. Эллиотт, Б.Ш. Шрейбер, Г.Д. Джонсон, К.Т. Болдуин, Б.У. Селлвуд, Х.К. Дженкинс, Д.А.В. Стоу, М. Эдуардз, А.Х.Г. Митчелл / Пер. с англ. / под ред. Х. Г. Рединга. – М.: Мир, 1990. – 352 с.
12. Selly R.C. Applied Sedimentology (2nd ed.). – San Diego: Elsevier, 2000. – 523 p.
13. Reading H.G., Collinson J.D. Clastic coasts // Sedimentary Environments: processes, facies and stratigraphy. 3rd ed. / Ed. by H.G. Reading. – Oxford: Wiley Blackwell, 1996. – 704 p.
14. An automatic variogram modeling method with high reliability fitness and estimates / Zhanglin Li, Xianin Zhang, Keith C. Clarke, Gang Liu, Rui Zhu // Computers & Geosciences. – 2018. – V. 120. – P. 48–59.
15. Палеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в меловом периоде / А.Э. Контарович, С.В. Ершов, В.А. Казаненков, Ю.Н. Карагодин, В.А. Контарович, Н.К. Лебедева, Б.Л. Никитенко, Н.И. Попова, Б.Н. Шурыгин // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5–6. – С. 745–776.
16. Закревский К.Е. Практикум по геологическому 3D-моделированию. Построение тестовой модели в Petrel 2011. – М., 2012. – 114 с.
17. Струкова О.В., Закревский К.Е. Геологическое моделирование в RMS. Практические упражнения. 2D и 3D моделирование. – М.: ROXAR, 2012. – 694 с.
18. Практические советы по 3D геологическому моделированию / Б.В. Белозёров, А.В. Буторин, П.Н. Герасименко, Е.В. Журавлёва, Р.З. Фаизов. – СПб.: Газпромнефть НТЦ, 2015. – 354 с.
19. Conditioning 3D object – based models to dense well data / Y.C. Wang, M.J. Pyrcs, O. Catuneanu, J.B. Boisvert // Computers & Geosciences. – 2018. – V. 115. – P. 1–11.
20. Основы трехмерного цифрового геологического моделирования / К.В. Абабков, Д.Д. Сулейманов, Ш.Х. Султанов, Ю.А., Котенев Д.И.: Варламов. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2010. – 199 с.

Поступила 24.04.2019 г.

Информация об авторах

Казанская Д.А., аспирант Тюменского Индустриального Университета.

Александров В.М., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии Тюменского Индустриального Университета; заместитель генерального директора по геологии АО «Тандем».

Белкина В.А., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Тюменского Индустриального Университета.

UDC 552.143

GEOLOGICAL MODELLING OF VIKULOVSKAYA SUITE PRODUCTION DEPOSITS

Diana A. Kazanskaya¹,
kazanskaya_d@aotandem.ru

Vadim M. Alexandrov^{1,2},
alexandrov_v@aotandem.ru

Valentina A. Belkina¹,
belkinava@tyuiu.ru

¹ Tyumen Industrial University,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

² «Tandem»,
57, Respubliki street, Tyumen, Russia.

The relevance. The tasks of researching, exploring, assessing oil and gas, designing, field developing are solved on the basis of geological models. Along with the fact that modern geological modelling allows obtaining three-dimensional descriptions of deposit, studying the character and variability of parameters of the formation and fluids saturated it, it allows as well estimating the uncertainties that inevitably arise in geological modelling of the formation. Thus, the accuracy of the solution of any geological problem is mainly determined by the adequacy of the three-dimensional model of the object. It is necessary to involve in addition to empirical data all kinds of indirect information in geological model. It is necessary to study sedimentation in time and space for detailed prediction of the size and shape of the reservoir, the distribution of zones of improved reservoir and correct construction of the geological model.

The main aim of the research is to improve the methods of geological three-dimensional modelling taking into account the conditions of sedimentation. This is caused by the fact that the lithofacial characteristics of production deposits are the main factors of heterogeneity of reservoir and oil-saturation of reservoirs. The technique that takes into account the facial structure of deposits allows constructing a discrete-continuous three-dimensional geological model, which describes correctly the geological object under study and has significantly higher prognostic properties.

Objects: vikulovskaya suite production deposits of Em-Egovskii licensed precinct.

Methods: detail well correlation, improved electrometric method of facial diagnostic, deterministic and stochastic methods of double dimensional and three-dimensional geological modelling.

Results. The authors have constructed the facial model by the core and GRW data, based on the improved technique of V.S. Muromtsev. The facial model includes the following facies groups: far beach area, transition beach area and pre-frontal beach area. A detailed correlation was carried out with the data of the new 192 wells. Three sedimentation cycles were distinguished within the formation VK1, according to the results of correlation. This cycles are characterized by a good consistency in the area. Based on more accurate seismic data and new wells data using sedimentation conditions the authors developed the refined model of vikulovskaya suite production deposits of Em-Egovskoe field. The geological structure of vikulovskaya suite production deposits has changed greatly according to the constructed model. External testing confirmed high accuracy and high prognostic properties of the developed geological model. The area of the deposits, oil-saturated thickness of the deposit and geological reserves have decreased according to the updated structure. The refinement and detailing of the formation structure will improve the efficiency of additional exploration of poorly studied parts and development. The proposed model of VK deposits is used to create a hydrodynamic model and to justify the most effective geological and technical measures.

Key words:

Seismic data, core, geophysical well research data, well correlation, conceptual model, geological model, vikulovskaya suite, deposit.

REFERENCES

1. Zaboieva A.A. *Razrabotka metodik trekhmernogo geomodelirovaniya v usloviyakh neodnorodnosti i neravnomernosti geologo-geofizicheskoy informatsii (na primere mestorogdeniy Zapadnoy Sibiri)*. Dis. Kand. nauk [Development of three-dimensional modeling techniques in terms of heterogeneity and irregularity of geological and geophysical information (on the example of West Siberia deposits). Cand. Diss.]. Tyumen, 2012. 167 p.
2. Deutsch C.V. *Geostatistical reservoir modeling*. New York, Oxford University Press, 2002. 376 p.
3. Belkina V.A., Bembel S.R., Zaboieva A.A., Sankova N.V. *Osnovy geologicheskogo modelirovaniya* (Ch. 1) [Fundamentals of geological modeling (P. 1)]. Tyumen, Tyumen of Oil and Gas State University, 2015. 168 p.
4. Martin R., Boisvert J.B. Towards justifying unsupervised stationary decisions geostatistical modeling: Ensemble spatial and multivariate clustering with geomodeling specific clustering metrics. *Computers & Geosciences*, 2018, vol. 120, pp. 82–96.
5. *Stochastic Modeling and Geostatistics. Principles, Methods, and Case Studies* (AAPG Computer Applications in Geology, No. 3). Eds. J.M. Yarus, R.L. Chambers. Tulsa, Oklahoma: AAPG, 1994. 379 p.
6. Rostovtsev N.N. *Stratigraficheskiy slovar mezozoiskikh i kaynozaiskikh otlozheniy Zapadno-sibirskoy nizmennosti* [Stratigraphic Dictionary of the Mesozoic and Cenozoic lowlands of West Siberia]. Leningrad, Nedra Publ., 1978. 183 p.
7. *Geologicheskoe stroenie i perspektivy neftegazonosnosti Zapadno-Sibirskoy nizmennosti* [Geological structure and oil and gas potential of the West Siberia lowlands]. Ed. by N.N. Rostovtsev. Moscow, Gosgeologtekhizdat Publ., 1958. 391 p.
8. Karagodin Yu.N. Neft i gaz vikulovskoy svity [Oil and gas of Vikulovskaya suite]. *Nauka v Sibiri*, 2008, no. 41, pp. 10–13.
9. Aleksandrov V.M., Kazanskaya D.A., Belkina V.A. Geneticheskaya klassifikatsiya tempestitov [Genetic classification of tempestites]. *Territorya Neftegaz*, 2014, no. 6, pp. 40–43.
10. Aleksandrov V.M., Kazanskaya D.A., Belkina V.A. Osobennosti formirovaniya tempestitov v otlozheniyakh vikulovskoy svity [Fe-

- atures of formation of tempestites in the deposits of the Vikulovskaya suite]. *Neft i gaz*, 2015, no. 5, pp. 10–15.
11. Reineck H.-E., Singh I.B. *Clastic sedimentation*. Translated from English. Moscow, Nedra Publ., 1990. 352 p.
 12. Selly R.C. *Applied Sedimentology* (2nd ed.). San Diego, Elsevier, 2000. 523 p.
 13. Reading H.G., Collinson J.D. *Clastic coasts. Sedimentary Environments: processes, facies and stratigraphy*. 3rd ed. Ed. by H.G. Reading. Oxford, Wiley Blackwell, 1996. 704 p.
 14. Zhanglin Li, Xianin Zhang, Clarke K.C., Gang Liu, Rui Zhu. An automatic variogram modeling method with high reliability fitness and estimates. *Computers & Geosciences*, 2018, vol. 120, pp. 48–59.
 15. Kontorovich A.E., Ershov S.V., Kazanekov V.A., Karogodin Yu.N., Kontorovich V.A., Lebedeva N.K., Nikitenko B.L., Popova N.I., Shurigin B.N. Paleografia Zapadno-Sibirskogo osadochnogo basseina v melovom periode [Paleography of the West Siberia sedimentary basin in the Cretaceous period]. *Geologiya i geofizika*, 2014, vol. 55, no. 5–6, pp. 745–776.
 16. Zakrevsky K.E. *Praktikum po geologicheskomy 3D-modelirovaniyu. Postroenie testovoy modeli v Petrel 2011* [Workshop on geological 3D modeling. Building a test model in Petrel 2011]. Moscow, 2012. 114 p.
 17. Strukova O.V., Zakrevsky K.E. *Geologicheskoe modelirovanie v RMS. Prakticheskie uprazhneniya. 2D i 3D modelirovanie* [Geological modeling in RMS. Practical exercises. 2D and 3D modeling]. Mosoc, ROXAR Publ., 2012. 694 p.
 18. Belozarov B.V., Butorin A.V., Gerasimenko P.N., Zhuravleva E.V., Faizov R.Z. *Prakticheskie sovety po 3D geologicheskomu modelirovaniyu* [Practical tips on 3D geological modeling]. St. Petersburg, Gazpromneft NTC Publ., 2015. 354 p.
 19. Wang Y.C., Pyrcs M.J., Catuneanu O., Boisvert J.B. Conditioning 3D object – based models to dense well data. *Computers & Geosciences*, 2018, vol. 115, pp. 1–11.
 20. Ababkov K.V., Suleymanov D.D., Sultanov Sh.Kh., Kotenev Yu.A., Varlamov D.I. *Osnovy trekhmernogo tsifrovogo geologicheskogo modelirovaniya* [Fundamentals of three-dimensional digital geological modeling]. Ufa, Oil and Gas Business Publ., 2010. 199 p.

Received: 24 April 2019.

Information about the authors

Diana A. Kazanskaya, postgraduate student, Tyumen Industrial University.

Vadim M. Alexandrov, Cand. Sc., associate professor, Tyumen Industrial University.

Valentina A. Belkina, Cand. Sc., associate professor, Tyumen Industrial University.

УДК 550.4: 548.4

ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РАСПЛАВОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ДУНИТ-ПЕРИДОТИТ-ГАББРОВЫХ МАССИВОВ ВОСТОЧНОГО САЯНА

Ступаков Сергей Иванович¹,
stupakov@igm.nsc.ru

Симонов Владимир Александрович^{1,2,3},
simonov@igm.nsc.ru

Мехоношин Алексей Сергеевич^{4,5},
mekhonos@igc.irk.ru

Колотилина Татьяна Борисовна^{4,5},
tak@igc.irk.ru

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского Отделения Российской Академии Наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

³ Казанский федеральный университет, Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18.

⁴ Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского Отделения Российской Академии Наук, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А.

⁵ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Актуальность. Изучение расплавных включений в минералах является одним из наиболее достоверных путей получения прямой информации о характере магматических процессов, позволяет построить модель образования интрузий и проследить эволюцию физико-химических условий кристаллизации магматических комплексов.

Цель: получить достоверные сведения о составе расплава, что дает возможность проследить эволюцию физико-химических условий образования пород платиноносного дунит-верлитового массива Медек.

Объекты: расплавные включения в хромшпинелидах дунитов и верлитов Медекского базит-ультрабазитового массивов.

Методы. Поиск расплавных включений проводился в монофракциях акцессорных хромшпинелидов из дунитов и верлитов массива. Полированные препараты просматривались под микроскопом, и отбирались зерна, содержащие многофазные микровключения определённой формы, размера (10–30 мкм) и положения внутри зерна. Далее проводились высокотемпературные эксперименты. Выбор температурного режима (1280–1300 °С) определялся задачей перевести включения в расплавленное состояние, затем его закалить, и полученное стекло проанализировать на рентгеновском микроанализаторе и сканирующем микроскопе.

Результаты. В результате анализа стекол гомогенизированных расплавных включений установлено, что состав родоначальной магмы, из которой кристаллизовались дуниты массива, отвечал пикритовидному расплаву (MgO 13,36 мас. %), который эволюционировал до низкокальцевого пикробазальтового расплава, наиболее близкого по петрохимическим характеристикам к данному по расплавным включениям в хромитах из океанических комплексов. Геотермобарометрические расчеты и моделирование с помощью программ COMAGMAT и PETROLOG свидетельствуют о становлении пород массива при давлении 3–5 кбар и температурном диапазоне 1400–1230 °С. Расчетные данные и результаты высокотемпературных экспериментов показали хорошую сходимость.

Ключевые слова:

Медекский массив, ультрабазиты, дуниты, верлиты, хромшпинелиды, расплавные включения.

Введение

При исследовании рудоносности базит-ультрабазитовых комплексов большое внимание уделяется генетическим проблемам [1–4]. На оценку перспектив платиноносности, прежде всего, влияют представления об условиях формирования пород [5–8] и составе исходной магмы. Ранее было обосновано, что изучение расплавных включений в минералах является одним из наиболее достоверных путей получе-

ния прямой информации о характере магматических процессов [9–20]. На примере ряда массивов Сибирского кратона [13, 14, 16, 21], в том числе и дунит-перидотит-габбровых массивов Восточного Саяна [22, 23], ранее была доказана эффективность применения разработанной нами методики [14] исследования расплавных включений в хромшпинелидах при изучении рудно-магматических систем, связанных с базит-ультрабазитовыми комплексами.

В настоящей статье представлены новые данные по минералам и расплавленным включениям в хромшпинелидах дунит-верлитового массива Медек, результаты компьютерной обработки оригинальной информации по составам минералов и включений, с помощью минералогических термометров и барометров, а также программ COMAGMAT [24–26] и PETROLOG [27], которые позволили выявить особенности эволюции физико-химических параметров магматических систем при его формировании.

Геолого-петрографические особенности пород массива Медек

Массив Медек расположен в центральной части Восточного Саяна, в междуречье Мал. Бирюса – Уда (рис. 1, врезка). Форма массива в плане эллипсовидная, длинная ось вытянута в субмеридиональном направлении, площадь выхода составляет около 2 км² (рис. 1). Хотя непосредственные границы с вмещающими породами не наблюдаются, о тектоническом характере взаимоотношений говорят отрицательные формы рельефа, развитые на контактах зоны милонитизации и катаклаза, сопровождающиеся метаморфогенным преобразованием пород.

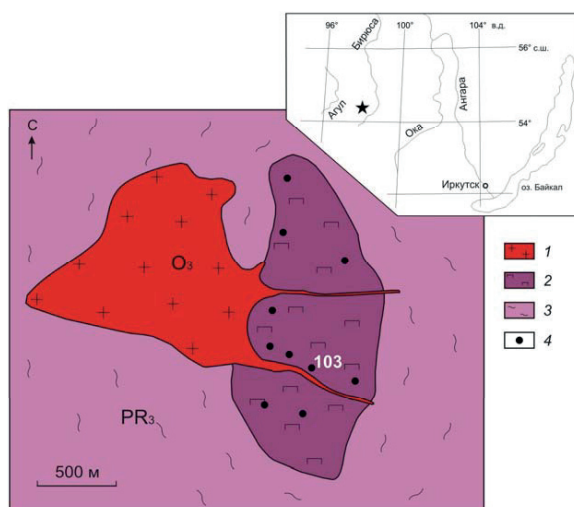


Рис. 1. Местоположение (врезка) и схематическая геологическая карта массива Медек (рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ [22, 28]). 1 – граниты, сиениты, диориты; 2 – ультрабазиты; 3 – гнейсы, сланцы, амфиболиты; 4 – положения скважин

Fig. 1. Location (inset) and schematic geological map of the Medek massif (figure is based on the original data using materials from the works [22, 28]). 1 – granites, syenites, diorites; 2 – ultrabasic rocks; 3 – gneisses, shales, amphibolites; 4 – the position of boreholes

Массив Медек сложен дунит-верлитовой дифференцированной серией пород с постепенными переходами между петрографическими разностями. Дуниты массива среднезернистые, микроструктура пород кумулятивная с четко проявленным идиоморфизмом зёрен оливина. Интеркуму-

лусный пироксен по составу отвечает хромдиопсиду. Главным акцессорным минералом является хромшпинелид. Для верлитов характерны кумулятивные и пойкилитовые структуры. В качестве акцессорного минерала в них кроме хромшпинелида появляется ильменит, который иногда находится с ним в тесном срастании. Породы массива в различной степени преобразованы низкотемпературными постмагматическими процессами, вплоть до образования в краевых частях хлорит-серпентиновых и актинолитовых сланцев.

Оруденение в массиве представлено в основном вкрапленными сульфидными рудами, которые состоят главным образом из пентландита, в переменных количествах присутствует халькопирит, троилит и кубанит. Максимальное количество сульфидов достигает 10 об. %. Минералы платиновой группы представлены главным образом сперрилитом и различными висмута-теллуридами палладия. Первичные минеральные ассоциации были преобразованы в условиях низких уровней фугитивности кислорода и серы в системе [23]. При этом в крайних случаях происходило образование аваруита и самородной меди и замещение сперрилита орселитом, а также Pt-Fe-Ni и Pt-Fe-Cu-сплавами.

Образцы и методы исследования

Поиск расплавленных включений проводился в монофракциях акцессорных хромшпинелидов из дунитов и верлитов массива. Химический состав хромшпинелидов определялся в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимические исследования» Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ИГХ СО РАН).

Полированные препараты просматривались под микроскопом, и отбирались зерна хромшпинелидов, содержащие многофазные микровключения определённой формы, размера (10–30 мкм) и положения внутри зерна. Далее проводились высокотемпературные эксперименты по методике [14, 29]. Выбор температурного режима (1280–1300 °C) определялся задачей перевести включения в расплавленное состояние, затем его закалить и полученное стекло проанализировать на рентгеновском микроанализаторе и сканирующем микроскопе.

Все экспериментальные исследования включений проводились в лаборатории геодинамики и магматизма Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Включения были изучены на электронном сканирующем микроскопе (СЭМ) LEO 1430 VP (ИГМ СО РАН). Пределы обнаружения компонентов: 0,1–0,25 мас. %. Составы включений и хромшпинелидов анализировались на рентгеновском микроанализаторе Camebax-Micro (ИГМ СО РАН). Пределы обнаружения (мас. %) компонентов этим методом следующие: SiO₂ – 0,007, TiO₂ – 0,032, Al₂O₃ – 0,011, Cr₂O₃ – 0,019, FeO – 0,019, MnO – 0,034, MgO – 0,011, CaO – 0,008, Na₂O – 0,017, K₂O – 0,009, Cl – 0,017, P₂O₅ – 0,011.

Для оценки РТ параметров кристаллизации ультраосновных пород массива Медек были использованы геотермобарометры, основанные на составах клинопироксенов [30–34] и амфиболов [35–40].

Определение физико-химических параметров формирования массива проводилось с помощью обработки оригинальной информации по составам расплавных включений программными комплексами COMAGMAT [24–26] и PETROLOG [27].

Составы минералов из верлитов массива Медек

Оливины. В слабо измененных верлитах оливин образует идиоморфные и гипидиоморфные зерна, размером 2–3 мм, в серпентинизированных он сохранился только в виде реликтов. Изучение состава оливина по разрезу массива показало, что содержание форстеритового компонента варьирует от 88–90 до 73 %, при этом содержания NiO уменьшаются от 0,3–0,4 до 0,1 мас. %, а MnO увеличиваются от 0,1 до 0,4 мас. % (табл. 1). Также сверху вниз по разрезу наблюдается уменьшение объемного содержания оливина с 98–96 до 65 %. Кроме того, вместо акцессорного хромшпинелида в виде включений в оливине появляется ильменит с низким содержанием MgO.

Таблица 1. Представительные анализы оливинов из верлитов массива Медек

Table 1. Representative analyses of olivines from wehrlite of the Medek massif

Образец Sample	SiO ₂	FeO	MnO	MgO	NiO	Сумма Total	Fo	Глубина Depth
14-85	39,30	12,70	0,20	47,50	0,20	99,90	87,00	386
14-92	40,60	14,30	0,30	44,20	0,30	99,70	84,70	429
14-99	40,30	13,80	0,30	45,70	0,30	100,40	85,50	456
14-100	40,00	14,10	0,30	44,40	0,30	99,10	84,90	457
14-102	40,20	15,20	0,20	45,10	0,30	101,00	84,10	471,4
14-103	39,10	18,10	0,40	42,20	0,20	100,00	80,60	483
14-112	38,50	22,70	0,30	37,70	0,10	99,30	74,80	517

Примечание. Глубина – глубина отбора пробы из керна скважины, м; Fo – содержание форстеритового минала в оливине.

Note. Depth – the depth of sampling from the well core, m; Fo – the content of the forsterite component.

Клинопироксены чаще реликтовые, по составу отвечают субкальциевому авгиту ($\text{Wo}_{42}\text{En}_{52}\text{Fs}_3$) и диопсиду ($\text{Wo}_{49}\text{En}_{48}\text{Fs}_3$), с содержаниями Al_2O_3 – 0,1–1,8 мас. %, Cr_2O_3 – до 0,7 мас. % (табл. 2).

Хромшпинелиды (в которых были найдены расплавные включения). Как показали проведенные нами ранее исследования ультраосновных комплексов [14], составы хромшпинелидов, содержащих расплавные включения и соответственно имеющих магматогенное происхождение, могут служить прямыми источниками сведений для петрологических построений. Поэтому особое внимание уделялось также и составу минералов-хозяинов. Проведенная оценка возможного влияния расплавных включений на состав хромшпинелидов продемонстрировала его полное отсутствие (табл. 3).

Таблица 2. Представительные анализы клинопироксенов из верлитов массива Медек

Table 2. Representative analyses of clinopyroxenes from wehrlite of the Medek massif

Образец Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	Сумма Total	En
14-95	55,21	0,19	н.о.	2,02	17,09	25,28	н.о.	99,79	46,88
14-96	55,26	0,17	н.о.	2,03	17,41	25,43	н.о.	100,30	47,20
14-97	55,91	0,14	н.о.	1,93	17,29	25,37	н.о.	100,64	47,16
14-93	54,95	н.о.	н.о.	1,62	17,09	25,51	н.о.	99,17	46,96
14-93	55,15	0,11	н.о.	1,75	17,61	25,51	0,11	100,24	47,41
14-93	54,83	0,20	0,11	1,82	17,44	25,12	0,13	99,64	47,47
14-93	54,94	0,16	н.о.	1,75	17,59	25,35	0,11	100,01	47,54
14-93	54,63	0,10	н.о.	1,83	17,50	25,26	0,13	99,44	47,42
14-99	55,09	н.о.	н.о.	1,69	17,28	25,34	0,12	99,52	47,14
14-99	54,62	0,11	н.о.	1,82	17,25	25,29	н.о.	99,09	47,08

Примечание. En – содержание энстатитового компонента; н.о. – не определено.

Note. En – content of the enstatite component; н.о. – not determined.

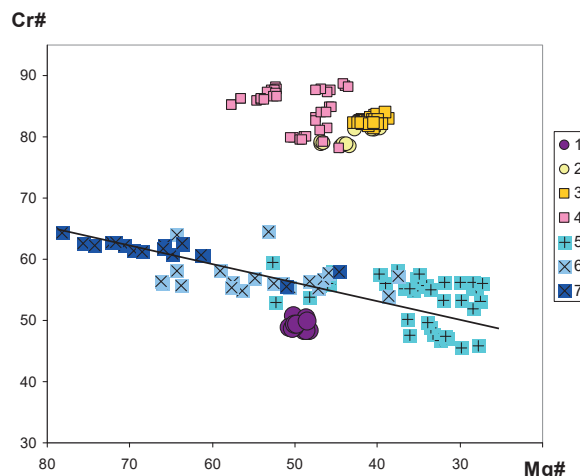


Рис. 2. Диаграмма Cr#–Mg# для хромшпинелидов из верлитов массива Медек (Восточный Саян). 1–7 – хромшпинелиды: из верлитов массива Медек (1); из дунитов Нижнетагильского массива, Урал (2); из дунитов Кондерского (3), Инаглинского (4) массивов; из дунитов Карашатского массива (5, офиолиты Южной Тувы); из троктолитов района Сьерра-Леоне (6) и из перидотитов зоны разлома 15°20' (7) в Центральной Атлантике. $\text{Mg\#} = \text{Mg}^*100 / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$. $\text{Cr\#} = \text{Cr}^*100 / (\text{Cr} + \text{Al})$. Рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ [14, 29, 41]

Fig. 2. Diagram Cr#–Mg# for Cr-spinel from wehrlite of the Medek massif (East Sayan). 1–7 – Cr-spinel: from wehrlite of the Medek massif (1); from dunites of the Nizhny Tagil massif, Ural (2); from dunites of the Kondersky (3), Inaglinsky (4) massifs; from dunites of the Karachat massif (5, ophiolites of the South Tuva); troctolites area Sierra Leone (6) and peridotites from the Fracture Zone 15°20' (7) in the Central Atlantic. $\text{Mg\#} = \text{Mg}^*100 / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$. $\text{Cr\#} = \text{Cr}^*100 / (\text{Cr} + \text{Al})$. The figure is based on the original data using materials from the works [14, 29, 41]

Проведенные исследования показали умеренную хромистость (Cr# до 50,7) рассмотренных хромшпинелидов, и по этому показателю они существенно отличаются от гораздо более хромистых минералов из ультрабазитов платиноносных массивов Сибирского кратона (Кондер и Инагли) и Урала

Таблица 3. Представительные анализы хромшпинелидов из верлитов массива Медек

Table 3. Representative analyses of Cr-spinel from wehrlite of the Medek massif

Образец/Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	NiO	Сумма/Total	Cr#
2-2А/2	0,06	0,16	27,93	38,74	22,89	0,16	10,67	0,02	0,05	0,03	100,70	48,20
2-2А/3	0,02	0,18	27,55	38,27	22,78	0,17	10,70	0,01	0,04	0,06	99,78	48,24
2-2А/4	0,02	0,24	27,70	38,44	22,66	0,18	10,67	0,02	0,04	0,06	100,02	48,21
2-1-3/1	0,05	0,27	25,88	39,66	22,95	0,20	10,95	0,10	0,05	0,08	100,17	50,69
2-1-3/2	0,04	0,32	26,98	38,43	22,69	0,14	11,17	0,03	0,06	0,07	99,92	48,86
2-1-3/3	0,03	0,22	27,36	38,78	22,78	0,13	11,06	0,02	0,04	0,08	100,52	48,74
2-13/4	0,02	0,26	27,33	38,58	22,90	0,19	11,09	0,03	0,04	0,08	100,54	48,64
2-1-2/1	0,05	0,33	26,21	39,58	22,95	0,15	10,64	0,03	0,03	0,08	100,04	50,32
2-1-2/2	0,01	0,23	26,83	38,83	23,18	0,15	10,99	0,02	0,03	0,08	100,36	49,26
2-1-2/3	0,03	0,23	26,83	38,99	22,94	0,19	10,93	0,02	0,04	0,04	100,22	49,36
2-1-2/4	0,05	0,35	26,30	38,87	23,59	0,20	10,59	0,08	0,03	0,13	100,18	49,79

Примечание/Note. Cr# = Cr*100/(Cr+Al)

(Нижнетагильский массив). При этом они хорошо согласуются с данными по хромитам из базит-гипербазитовых комплексов современных и древних (офиолиты) океанов (рис. 2). По соотношению хрома и железа изученные хромиты из верлита массива Медек наиболее соответствуют минералам из ультрабазитов Срединно-Атлантического хребта (САХ) в районе Сьерра-Леоне. По соотношению TiO₂ – Mg# они наиболее близки к хромитам из дунитов Карашатского массива (офиолиты Южной Тувы). Необходимо отметить, что хромшпинелиды из рассмотренных базит-ультрабазитовых пород современных (Срединно-Атлантический хребет) и древних (Карашатский массив) океанических структур содержат расплавные включения и, соответственно, имеют магматогенное происхождение [29, 41].

Расплавные включения в хромшпинелидах из верлитов массива Медек

Было установлено, что хромшпинелиды из всех изученных проб содержат микровключения, которым присущи некоторые признаки, характерные для расплавных включений. При тщательном просмотре выяснилось, что «включения» в хромитах из дунитов и части верлитов обладают очень невыдержанными формами и разнообразным содержимым, без характерных пузырьков газа, что не позволяет их использовать для дальнейшего физико-химического моделирования. В единственном образце, в хромшпинелидах из верлита, найденные силикатные включения по внешним признакам и химическому составу соответствовали включениям расплавов.

Исследования на СЭМ показали, что прогретые силикатные включения содержат флюидный пузырек, располагающийся в гомогенной среде и имеющий почти всегда фактически эталонную круглую форму (рис. 3, А, Б). Такого рода равновесные формы флюидных включений являются характерным признаком расплавных, которые при нагреве и быстром охлаждении превратились в стекло. Соотношение объемов флюидных пузырьков и включений свидетельствует о существенном содержании летучих компонентов в магматических системах.

В зависимости от количества внутренних фаз включения подразделяются на две группы: 1) со стеклом и флюидным пузырьком (рис. 3, А, Б) и

2) со стеклом, пузырьком и кристаллическими фазами (рис. 3, В, Г). Кристаллические фазы представляют собой реликты высокомагнезиального тугоплавкого оливина, вокруг которого в одном случае (на пример № 4 на рис. 3, В) образуется кайма, а в другом (№ 3 на рис. 3, Г) он обрастает со всех сторон новообразованными микрокристаллическими фазами. В обоих случаях светлые микрокристаллики образуют фактически структуру спинифекс (рис. 3, В, Г), сформировавшуюся практически мгновенно во время закалки микроконтейнера с пробой в воде. Кроме игольчатой, новообразованные кристаллы иногда приобретают изометричную форму (№ 4 на рис. 3, Г), и по данным количественного анализа (табл. 4) находятся ближе всего к высоко титанистому амфиболу – керсутиту (субкальцийевый субкремнистый ферро-керсутит) [40]. В то же время недоплавленные оливины во включениях имеют высокие значения форстеритового компонента, сравнимые с данными по оливинам из дунитов Медекского массива.

Таблица 4. Представительные анализы кристаллических фаз в прогретых включениях в хромшпинелидах из верлитов массива Медек

Table 4. Representative analyses of crystal phases in heated inclusions in the Cr-spinel from wehrlite of the Medek massif

Образец/Sample	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	41,25	40,74	40,45	40,43	32,32	30,57
TiO ₂	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	18,6	19,51
Al ₂ O ₃	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	8,23	7,43
Cr ₂ O ₃	1,01	1,02	1,02	1,23	1,4	1,17
FeO	7,87	8,99	10,45	10,09	16,49	17,99
MnO	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,33
MgO	49,46	48,79	47,46	47,99	7,91	11,06
CaO	н.о.	н.о.	0,19	0,26	10,84	8,59
Na ₂ O	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,24	1,33
K ₂ O	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,15	н.о.
NiO	0,42	0,47	0,42	н.о.	н.о.	н.о.
Сумма/Total	100,01	100,01	99,99	100	97,18	97,98
Fo	91,42	90,2	88,4	89,14	–	–

Примечание. 1–4 – оливин; 5, 6 – кристаллические фазы, близкие по химическому составу к амфиболом (керсутитам); н.о. – не определено.

Note. 1–4 are the olivine; 5, 6 are the crystalline phases similar in chemical composition of the amphiboles (kaersutite); н.о. – not determined.

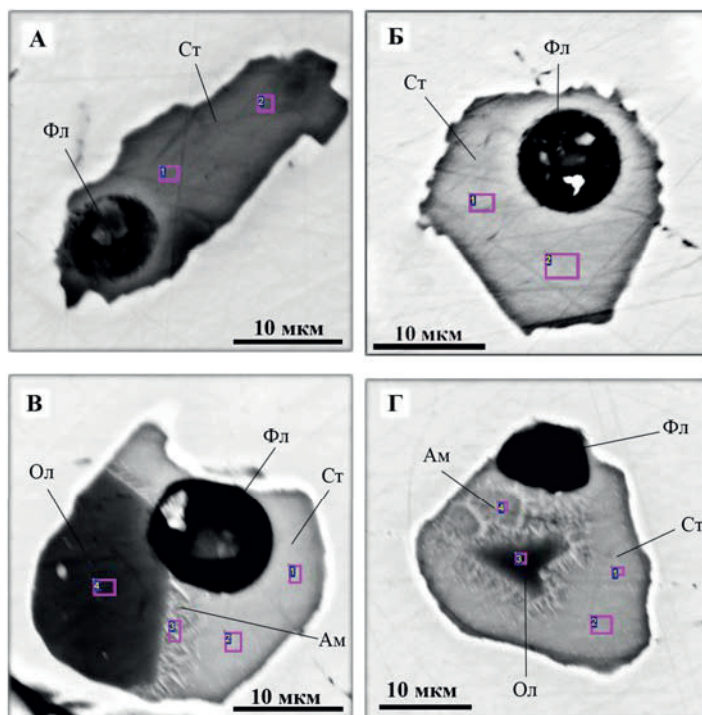


Рис. 3. Первичные силикатные микровключения в хромшпинелидах из верлитов массива Медек (после высокотемпературных опытов и закалки): А – первичное двухфазное расплавленное включение первого типа после высокотемпературного эксперимента и закалки; Б – двухфазное расплавленное включение второго типа после высокотемпературного эксперимента и закалки; В, Г – расплавленные включения с недоплавленными и новообразованными кристаллическими фазами после высокотемпературных экспериментов и закалки. Сканирующий микроскоп. Отмечены участки анализов. Фл – флюидный пузырек; Ст – гомогенное силикатное стекло; Ол – недоплавленные реликты оливины; Ам – новообразованные микрокристаллиты амфибола

Fig. 3. Primary silicate micro-inclusions in Cr-spinel from wehrlite of the Medek massif (after high-temperature experiment and quenching): А – primary two-phase melt inclusion of the first type after high-temperature experiment and quenching; Б – two-phase melt inclusion of the second type after high-temperature experiment and quenching; В, Г – melt inclusions with under-melted and newly formed crystalline phases after high-temperature experiments and quenching. Scanning microscope. Marked areas of analysis. Фл – fluid bubble; Ст – homogeneous silicate glass; Ол – under-melted relicts of olivine; Ам – newly formed amphibole microcrystallites

Описанные выше особенности соотношений различных фаз, заполняющих расплавленные включения, сформировались в ходе высокотемпературных экспериментов, в результате которых в зависимости от продолжительности происходило полное расплавление содержимого или (при недостатке времени, а также, возможно, и температуры) оставались реликты оливины, обраставшие при закалке новыми фазами.

В одном случае содержимое включений было полностью расплавлено и при закалке образовались только две фазы: стекло (закаленный силикатный расплав) и флюидный пузырек. В других случаях времени (и возможно температуры) экспериментов, по всей вероятности, не хватило для полного расплавления содержимого включений и внутри остались недоплавленные кристаллики оливины, на которые в ходе закалки нарастали новообразованные кристаллические фазы. Это позволяет сделать вывод, что для реконструкции физико-химических параметров реальной магматической системы необходимо использовать результаты изучения стекол двухфазовых включений.

Составы расплавов, участвовавших в формировании верлитов массива Медек

Количественный анализ на сканирующем электронном микроскопе и на микрозонде стекол из прогретых и закаленных двухфазных расплавленных включений (стекло + круглый флюидный пузырек) в хромшпинелидах показал наличие двух типов силикатных расплавов (табл. 5).

Расплавленные включения первого типа обладают нормальной щелочностью, и по соотношению суммы $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (до 1.6 мас. %) и содержаний SiO_2 относятся к толеитовой серии, что характерно также для включений в хромшпинелидах из базит-ультрабазитовых комплексов САХ и офиолитов Южной Тувы [29, 41]. Однако, сравнивая их состав с уровнем содержаний щелочей во включениях из хромитов массива Кондёр [14, 21], можно отметить, что последним присущи более высокие величины содержаний K_2O .

По уровню содержаний MgO (10,5–13,4 мас. %) и SiO_2 (44,8–46,5 мас. %) включения этого типа располагаются на границе полей оливиновых базальтов и пикробазальтов (рис. 4), наиболее близки к ним по соотношению этих элементов сте-

Таблица 5. Представительные анализы стекол прогретых включений в хромшпинелидах из верлитов массива Медек

Table 5. Representative analyses of glasses of heated inclusions in Cr-spinel from wehrilite of the Medek massif

№	Образец/Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Сумма/Total
1	2A-2	46,14	0,87	13,36	1,18	9,47	0,11	13,36	14,96	1,18	0,27	0,06	100,96
2	2A-2/1	45,79	0,91	13,74	1,23	9,59	0,15	10,68	16,26	1,30	0,25	0,05	99,95
3	2A2/2	45,90	0,98	13,55	1,38	9,44	0,11	11,41	15,86	1,15	0,27	0,03	100,07
4	2A-2/4	45,87	0,96	13,37	1,26	9,47	0,17	11,08	15,99	1,27	0,27	0,06	99,77
5	2A-2/5	46,42	0,89	13,62	1,37	9,16	0,18	11,86	15,64	1,16	0,25	0,05	100,60
6	2-2A/7	45,58	0,88	13,65	1,18	9,00	0,12	11,19	15,39	1,27	0,28	0,07	98,60
7	2-2A/8	45,80	0,85	13,23	1,39	9,28	0,09	11,05	15,43	1,21	0,26	0,06	98,66
8	2-2A/9	46,54	0,96	13,75	1,22	9,07	0,10	10,45	15,86	1,19	0,27	0,07	99,48
9	2-2a-2/1	45,63	0,82	13,68	1,28	10,44	н.о.	10,54	16,06	1,26	0,30	н.о.	100,01
10	2-2a-2/2	44,79	0,85	13,02	1,82	10,41	н.о.	11,46	16,08	1,23	0,35	н.о.	100,01
11	2-1-2/1	32,74	3,86	6,69	1,73	21,16	0,39	9,44	19,68	0,36	0,02	2,24	98,31
12	2-1-2/2	32,43	3,78	6,75	1,98	20,87	0,36	9,29	19,87	0,34	0,02	2,27	97,96
13	2-1-2/1	32,79	3,71	6,61	1,79	23,24	0,45	9,14	20,08	н.о.	н.о.	2,20	100,01
14	2-1-2/2	32,47	3,48	6,86	1,83	23,49	0,43	9,07	20,17	н.о.	н.о.	2,21	100,01
15	2-1-3/1	31,95	4,01	6,67	1,97	21,67	0,36	9,38	19,55	0,37	0,03	2,17	98,13
16	2-3-1/2	32,60	3,87	6,85	1,69	21,57	0,37	9,32	19,42	0,35	0,02	2,17	98,23
17	2-1-3/1	32,76	3,70	6,75	1,50	23,37	0,47	8,88	19,86	0,43	н.о.	2,29	100,01
18	2-1-3/2	32,72	3,71	6,87	1,68	23,37	0,44	8,91	20,00	0,22	н.о.	2,09	100,01

Примечание. 1–10 – включения первого типа; 11–18 – включения второго типа; н.о. – не определено.

Note. 1–10 are the inclusions of the first type; 11–18 are the inclusions of the second type; н.о. – not determined.

кла из расплавных включений Нижнетагильского и, в меньшей степени, Карашатского массивов.

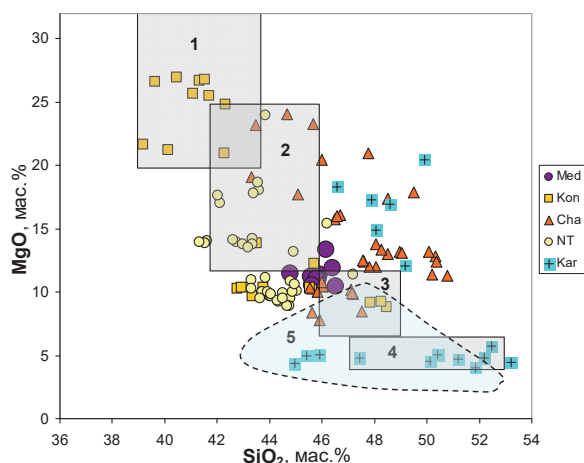


Рис. 4. Диаграмма MgO–SiO₂ для стекол двухфазных (после высокотемпературных экспериментов) включений первого типа в хромшпинелидах из верлитов массива Медек. Стекла расплавных включений в хромшпинелидах: из верлитов массива Медек (Med); из дунитов Кондерского (Kon), Чадского (Cha), Нижнетагильского (NT) и Карашатского (Kar) массивов. Поля по [42]: 1 – пикриты, 2 – пикробазальты, 3 – оливиновые базальты, 4 – базальты, 5 – стекла расплавных включений в хромшпинелидах из троктолитов района Сьерра-Леоне (Срединно-Атлантический хребет). Рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ [14, 29, 41]

Fig. 4. MgO–SiO₂ diagram for glass of two-phase (after high-temperature experiments) inclusions of the first type in Cr-spinel from wehrilite of the Medek massif. Glass of melt inclusions in Cr-spinel: from wehrilite of the Medek massif (Med); from dunite Conder (Kon), Chad (Cha), Nizhny Tagil (NT) and Karashat (Kar) massifs. Fields: 1 – picrites, 2 – picrobasalts, 3 – olivine basalts, 4 – basalts, 5 – glass of melt inclusions in chrome spinel from troctolite of Sierra Leone (Mid-Atlantic ridge). The figure is based on the original data using materials from the works [14, 29, 41]

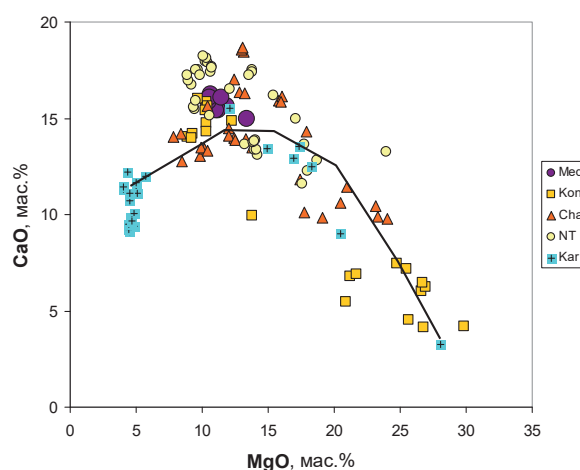


Рис. 5. Соотношение CaO–MgO в составах стекол двухфазных (после высокотемпературных экспериментов) включений первого типа в хромшпинелидах из верлитов массива Медек

Fig. 5. CaO–MgO ratio in compositions of glass of two-phase (after high-temperature experiments) inclusions of the first type in Cr-spinel from wehrilite of the Medek massif

С помощью диаграмм, показывающих зависимость значений химических компонентов в расплавных включениях в хромитах от MgO, можно выявить особенности эволюции магматических систем при кристаллизации расслоенных базит-ультрабазитовых плутонов. Подобная ситуация была нами рассмотрена на примере Карашатского базит-ультрабазитового массива [41]. Составы включений в хромитах целого ряда массивов трассируют путь последовательной внутрикамерной кристаллизации расплавов (рис. 5), что характерно и для расплавных включений этого типа в массиве Медек. При этом точки их составов находятся в тесной ассоциации с данными по породам верлит-клинопироксенит-габбровой серии Карашатского массива. Та-

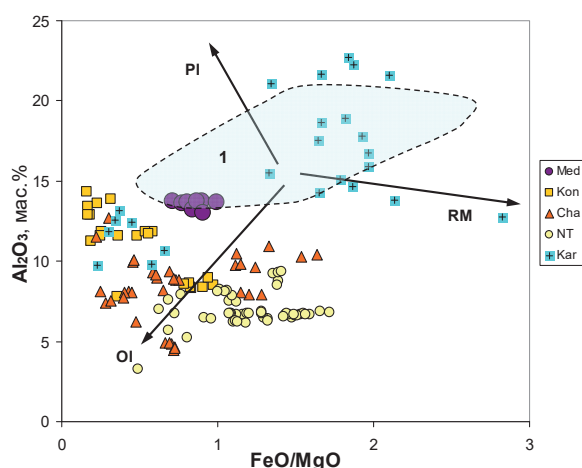


Рис. 6. Соотношение Al_2O_3 – FeO/MgO в составах стекол двух-фазных (после высокотемпературных экспериментов) включений первого типа в хромшпинелидах из верлитов массива Медек. Тренды: Ol – оливиновые кумуляты, Pl – плагиоклазовые кумуляты, RM – остаточные расплавы. 1 – поле стекол расплавных включений в хромшпинелидах из троктолитов района Сьерра-Леоне (Срединно-Атлантический хребет). Остальные условные обозначения см. на рис. 4. Рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ [14, 29, 41]

Fig. 6. Al_2O_3 – FeO/MgO ratio in compositions of glass of two-phase (after high-temperature experiments) inclusions of the first type in chrome spinel from wehrlite of the Medek massif. Trends: Ol – olivine cumulates, Pl – plagioclase cumulate, RM – residual melts. 1 – field of glass of melt inclusions in chrome spinel from troctolite of Sierra Leone (Mid-Atlantic ridge). Other symbols are shown in Fig. 4. The figure is based on the original data using materials from the works [14, 29, 41]

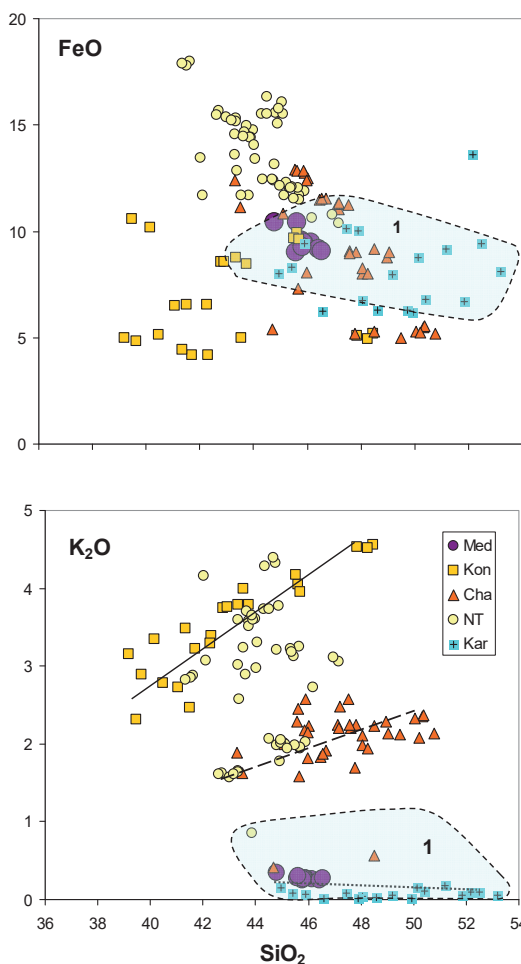
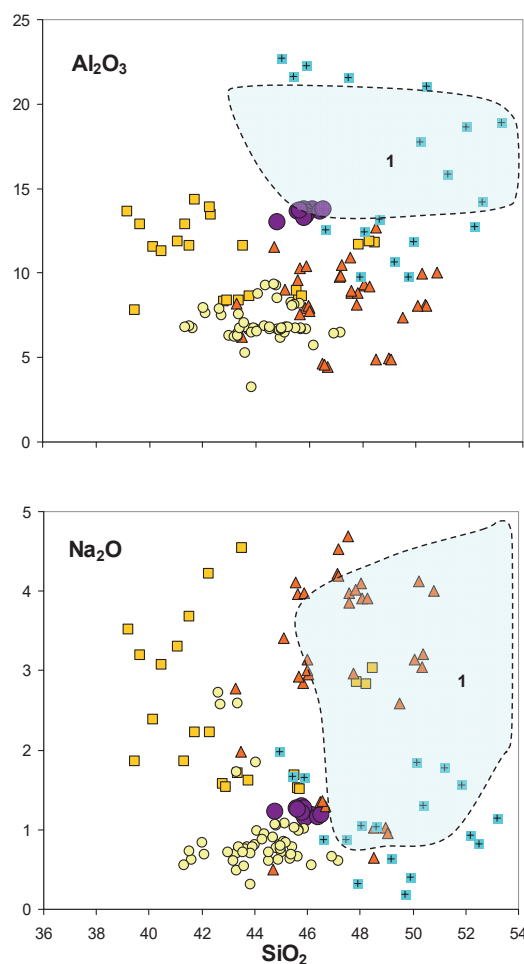


Рис. 7. Вариационные диаграммы (мас. %) для стекол двухфазных (после высокотемпературных экспериментов) включений первого типа в хромшпинелидах из верлитов массива Медек. 1 – поле стекол расплавных включений в хромшпинелидах из троктолитов района Сьерра-Леоне (Срединно-Атлантический хребет). Остальные условные обозначения см. на рис. 4. Рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ [14, 29, 41]

Fig. 7. Variation diagrams (wt. %) for glasses of two-phase (after high-temperature experiments) inclusions of the first type in Cr-spinel from wehrlite of the Medek massif. 1 – field of glass of melt inclusions in Cr-spinel from troctolite of Sierra Leone (Mid-Atlantic ridge). Other symbols are shown in Fig. 4. The figure is based on the original data using materials from the works [14, 29, 41]

кая же картина наблюдается и на диаграмме Al_2O_3 и FeO/MgO , где фигуративные точки составов включений первого типа лежат недалеко от линии тренда, характерного для оливиновых кумулатов, и тесно ассоциируют с полями составов включений из троктолитов района Сьерра-Леоне (рис. 6).

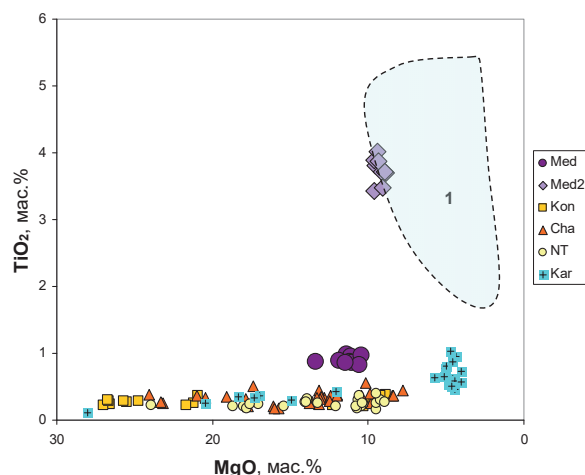


Рис. 8. Содержания титана в стеклах двухфазных (после высокотемпературных экспериментов) включений второго типа в хромшпинелидах из верлитов массива Медек. Стекла расплавных включений в хромшпинелидах: из верлитов массива Медек (первый тип – Med, второй тип – Med2); из дунитов Кондерского (Kon), Чадского (Cha), Нижнетагильского (NT) и Карашатского (Kar) массивов. 1 – поле стекол расплавных включений в хромшпинелидах из троктолитов района Сьерра-Леоне (Срединно-Атлантический хребет). Рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ [14, 29, 41]

Fig. 8. Content of titanium in glasses of two-phase (after high-temperature experiments) inclusions of the second type in Cr-spinel from wehrlite of the Medek massif. Glass of melt inclusions in Cr-spinel from wehrlite of the Medek massif (first type – Med, the second type – Med2); from dunites of the Konder (Kon), Chad (Cha), Nizhny Tagil (NT) and Karachat (Kar) massifs. 1 – the field of glass of melt inclusions in Cr-spinel from troctolite of Sierra Leone (Mid-Atlantic ridge). The figure is based on the original data using materials from the works [14, 29, 41]

На других вариационных диаграммах (рис. 7) стекла включений первого типа наиболее близки по основным петрохимическим компонентам (SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , Na_2O , K_2O) к данным по расплавленным включениям в хромшпинелидах из пород океанических структур – Карашатский массив (офиолиты Южной Тувы) и район Сьерра-Леоне (Срединно-Атлантический хребет). Особенно это хорошо видно по соотношению $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$, когда расплавные включения в хромшпинелидах массива Медек, офиолитов Южной Тувы и Срединно-Атлантического хребта образуют единый низкокалийевый (менее 1 %) тренд, в отличие от включений из платиноносных массивов, обладающих явно повышенными содержаниями K_2O (рис. 7). Эти данные позволяют сделать вывод о том, что образование верлитов происходило при участии низкокалийевых пикробазальтовых расплавов нормальной

щелочности, наиболее близких по петрохимическим характеристикам к данным по расплавленным включениям в хромитах из океанических комплексов.

В то же время наличие многофазных включений с недоплавленными кристалликами оливина свидетельствует в пользу предположения, что исходная магма для пород массива была более магнезиальной, чем пикробазальтовый расплав. Исходя из этого нами был рассчитан предполагаемый состав первичного расплава для пород массива Медек [22], который по уровню содержаний SiO_2 (45 мас. %) и MgO (18 мас. %) отвечает пикриту.

Расплавные включения второго типа. Фазовый состав и морфология (рис. 3, Б) расплавных включений второго типа идентичны таковым первого. Главные отличия заключаются в особенностях химического состава, а именно: высоких содержаниях TiO_2 (макс. 3,7 мас. %), FeO (макс. 23,5 мас. %), P_2O_5 (макс. 2,3 мас. %), при этом средние содержания SiO_2 составляют всего 32,6 мас. %. Полные аналоги магматических пород и расплавных включений такого состава нам не известны. Кроме того, наблюдаемые соотношения компонентов во включениях этого типа вряд ли могут соответствовать составу расплава, из которого осаждались изученные хромшпинелиды. Однако возможность существования таких, по сути, рудоносных расплавов подтверждается результатами изучения Fe-Ti интрузивных комплексов Центральной Атлантики [29] (рис. 8).

Эволюция физико-химических условий кристаллизации расплавов при формировании массива Медек

Основой для выяснения особенностей эволюции физико-химических условий кристаллизации магматических систем массива Медек являются исследования расплавных включений в хромшпинелидах из верлитов. В то же время к решению генетических задач привлекались и другие методы, включая минералогические термометры и барометры, а также расчетное моделирование, так как только согласованные результаты различных методов могут послужить наиболее обоснованными выводами об условиях кристаллизации пород.

Прежде всего, наличие первичных силикатных расплавных включений в хромшпинелидах (и преобразование их содержимого после высокотемпературных опытов в равновесную систему гомогенное стекло + круглый флюидный пузырек) прямо свидетельствует о том, что рассмотренные верлиты массива Медек формировались из расплавов. Данные по стеклам прогретых включений (с содержанием магния до 13,4 мас. %), близкие к пикробазальтовым магмам, позволили рассчитать возможный состав исходного пикритоидного расплава (с MgO – 17,85 мас. %) для массива Медек [22]. Именно эти составы расплавов послужили в дальнейшем основой для расчетов условий кристаллизации рассмотренных верлитов.

Как было отмечено выше, основой для решения генетических задач послужили данные по расплавленным включениям. При этом дополнительную и весьма важную информацию удалось получить с помощью минералогических термометров и барометров. В частности, на основе составов клинопироксенов были рассчитаны с использованием минералогических термометров и барометров [31–33] РТ параметры кристаллизации верлитов массива Медек: около 1255 °С при давлении 2,3–5,9 кбар. Очень полезную информацию несут находящиеся в расплавленных включениях в хромшпинелидах микрокристаллики амфиболов (рис. 3, В, Г), опираясь на составы которых, по минералогическому барометру [36], удалось оценить давление: 3,2–4,2 кбар.

Температуры кристаллизации верлитов были получены в результате численного моделирования в программном комплексе PETROLOG [27]. Основой для расчетов послужили составы стёкол включений первого типа, граничные условия соответствовали давлению 4 кбар (установлено по усредненным оценкам по пироксеновым и амфиболовым геобарометрам), H_2O – 0,5 %, расчетная величина хромистости хромшпинелида корректировалась по реальным значениям и составила 48,2 %. Исходя из этого, было установлено, что температура кристаллизации оливинов снижалась от 1275 до 1240 °С, хромшпинелиды формировались в диапазоне 1260–1240 °С, а клинопироксены – 1235–1220 °С, данные по которым хорошо согласуются с оценками по геотермометру.

Расчеты условий кристаллизации расплавов по программе COMAGMAT [24, 25] проведены на основе данных по составам расплавленных включений первого типа в хромшпинелидах из верлита и с учетом результатов использования минералогических термометров и барометров.

Равновесная кристаллизация возможного исходного расплава (с MgO – 17,85 мас. %) в ходе декомпрессии от 10 кбар (низы коры) до 2 кбар. Буфер QFM. Содержание воды – 0,5 мас. %. Расчеты показали широкие диапазоны возможных давлений кристаллизации минералов из верлитов массива Медек. В то же время данные по реальным составам оливинов ($Fo=80,6–85,5$) и клинопироксенов ($En=46,8–47,6$) верлитов этого массива в ходе анализа результатов расчетного моделирования позволили уточнить давления при кристаллизации оливинов (2,6–4,9 кбар) и клинопироксенов (2,9–3,6 кбар). Обращают на себя внимание перекрывающиеся в значительной мере диапазоны давлений при формировании этих двух минералов, а также сходство с оценками по пироксеновым и амфиболовым барометрам.

Расчеты фракционной кристаллизации того же исходного расплава (с MgO – 17,85 мас. %) при тех же условиях (в ходе декомпрессии от 10 кбар до 2 кбар; буфер QFM; H_2O – 0,5 мас. %) показали реальные максимальные давления (с учетом составов минералов) для оливина – до 4,9 кбар, и для клинопироксена – до 4,2 кбар, что подтверждает

результаты равновесной кристаллизации и минералогических барометров.

Таким образом, проведенные расчеты по различным минералогическим барометрам и по различным моделям кристаллизации на основе составов расплавленных включений показали, что давление при формировании верлитов массива Медек было около 4 кбар (в среднем 2,8–4,7 кбар).

Термометрия равновесий минерал–расплав. Изобарическая система – 4 кбар (согласно оценкам по минералогическим барометрам и равновесной декомпрессионной кристаллизации). Буфер QFM. Состав магмы – стекло расплавленных включений пикробазальтового состава (MgO – 13,36 мас. %) и рассчитанный состав исходного расплава (MgO – 17,85 мас. %). Содержание воды – 0,5 мас. %. В результате для исходного пикритоидного расплава определены следующие температуры равновесия: оливин – 1380 °С, клинопироксен – 1270 °С. В случае пикробазальтового расплава: оливин – 1300 °С, клинопироксен – 1240 °С. Обращает на себя внимание соответствие рассчитанных в случае пикробазальтового расплава (данные по составу расплавленных включений) температур кристаллизации клинопироксена с данными по пироксеновому термометру и по результатам расчетов с помощью программы PETROLOG [27].

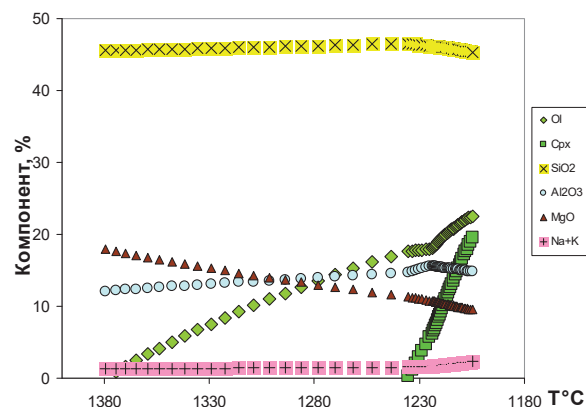


Рис. 9. Фракционная кристаллизация исходного расплава (MgO – 17,85 мас. %) для массива Медек. Компонент, % – изменения содержания минералов (Ol – оливин, Cpx – клинопироксен) и химических компонентов ($Na+K=Na_2O+K_2O$, мас. %) в расплаве при снижении температуры. Расчетное моделирование с помощью программы COMAGMAT [25, 26]

Fig. 9. Fractional crystallization of the initial melt (MgO – 17,85 wt. %) for the Medek massif. Component, % – changes in mineral content (Ol – olivine, Cpx – clinopyroxene) and chemical components ($Na+K=Na_2O+K_2O$, wt. %) in the melt with decreasing temperature. Computational modeling using COMAGMAT [25, 26]

Расчеты фракционной кристаллизации исходного расплава (MgO – 17,85 мас. %) при тех же условиях (в изобарической системе – 4 кбар. Буфер QFM. Содержание воды – 0,5 мас. %) показали, что оливин начинает кристаллизоваться при 1375 °С (совпадает с данными по равновесию – 1380 °С). Процессы снижения температуры и роста

количества оливина происходят относительно быстро – до 1235 °С, когда начинает кристаллизоваться клинопироксен (рис. 9). Далее интенсивно растёт клинопироксен и скорость его накопления превышает кристаллизацию оливина практически в четыре раза – идет формирование верлита. Таким образом, мы видим, что дуниты массива Медек формируются начиная с 1380 °С, а верлиты образуются при более низких температурах – 1235 °С.

Одновременно с кристаллизацией оливина и клинопироксена закономерно изменяется состав остаточного расплава: падает MgO, растёт количество щелочей. Интересно поведение SiO₂ – с началом кристаллизации клинопироксена рост этого компонента сменяется падением при снижении температуры. Фактически проявляется реверсивный тренд, хорошо выделяющийся на диаграмме MgO–SiO₂ (рис. 10, А) и отмеченный нами при изучении расплавных включений в хромшпинелидах из пород других ультраосновных массивов [21]. Очень важным является факт расположения составов расплавных включений вдоль расчетных трендов изменения состава расплава (рис. 10, А, Б), то есть здесь экспериментальные данные по включениям с одной стороны подтверждают достоверность проведенных расчетов, а с другой – такое соотношение показывает, что включения не являются случайностью, а фиксируют закономерную и теоретически обоснованную эволюцию расплава.

На диаграмме CaO–MgO (рис. 10, Б) точки составов стекол расплавных включений приурочены в основном к изгибу тренда изменения состава расплава, который практически совпадает с магниевой ветвью тренда расплавных включений в хромшпинелидах из дунитов Карашатского массива (Южная Тува).

Расчеты фракционной кристаллизации пикробазальтового расплава (состав стекла расплавного включения с максимальным MgO – 13,36 мас. %) в изобарической системе (4 кбар. Буфер QFM. Содержание воды – 0,5 мас. %) показывают, что оливин начинает кристаллизоваться около 1275 °С, но количество его (до 12 %) существенно меньше, чем клинопироксена (до 28 %), который образуется при более низких температурах, начиная с 1230 °С (рис. 11). Обращает на себя внимание сходство этих параметров со всеми полученными другими методиками температурными характеристиками для клинопироксена. В случае оливина температуры согласуются с данными моделирования по программе PETROLOG [27].

Расчеты условий кристаллизации пород по разрезу массива Медек были проведены для исходного расплава (MgO – 17,85 мас. %) при условиях изобарической системы – 4 кбар. Буфер QFM. Содержание воды – 0,5 мас. %. Наличие данных по реальным составам оливинов в образцах, отобранных по разрезу скважины [28], позволяет оценить достоверность результатов расчетного моделирования.

В настоящий момент расположение массива Медек перевернуто по отношению к его первичному залеганию [28]. В связи с этим на рис. 12 с данными по расчетному моделированию процессов кристаллизации в исходной камере метраж по скважине идет в обратном направлении – снизу вверх. Соответственно максимальным температурам (около 1380–1350 °С) кристаллизации оливина (на нижних уровнях камеры) соответствует его состав с максимальными значениями форстеритового компонента. Далее при понижении температуры до 1300–1270 °С (в средних горизонтах камеры, отметки скважины 250–350 м) расчетное со-

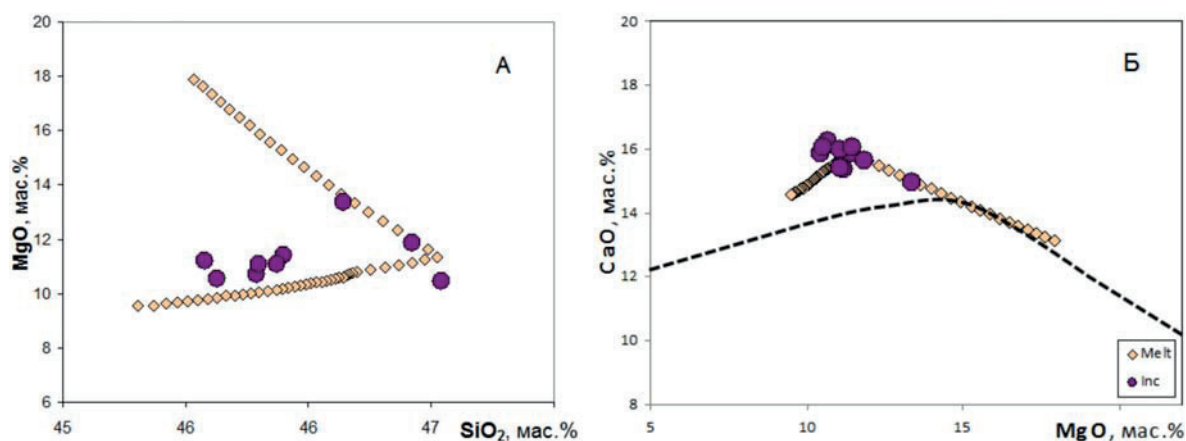


Рис. 10. Эволюция состава исходного расплава (MgO – 17,85 мас. %) в ходе его фракционной кристаллизации. Melt – состав расплава; Inc – состав стекла расплавных включений первого типа в хромшпинелидах из верлитов массива Медек. Пунктиром показан тренд составов расплавных включений в хромшпинелидах из дунитов Карашатского массива, Южная Тува [41]. Расчетное моделирование с помощью программы COMAGMAT [25, 26]

Fig. 10. Evolution of the initial melt composition (MgO – 17,85 wt. %) during its fractional crystallization. Melt is the melt composition; Inc is the composition of glass of melt inclusions of the first type in Cr-spinel from wehlite of Medek massif. The dashed line shows the trend of compositions of melt inclusions in Cr-spinel from dunites Karachat array, southern Tuva [41]. Computational modeling using COMAGMAT [25, 26]

держание Fo практически совпадает с данными по реальным анализам оливинов.

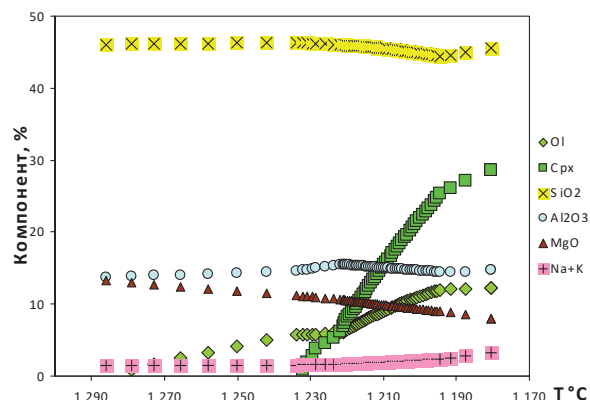


Рис. 11. Фракционная кристаллизация пикробазальтового расплава состава стекла прогретого расплавленного включения первого типа (с максимальным MgO – 13,36 мас. %) в хромшпинелиде из верлитов массива Медек

Fig. 11. Fractional crystallization of the picrobasalt melt of the glass composition of the heated melt inclusion of the first type (with a maximum MgO – 13,36 wt. %) in Cr-spinel from wehrlite of the Medek massif

В последующем (с 1240–1230 °С, около отметки 380–400 м) начинается интенсивная кристаллизация клинопироксена, преобладающая над образованием оливина, состав которого (как расчетный, так и реальный) существенно меняется с падением форстеритового компонента – формируются верлиты на самых верхних уровнях камеры (рис. 12). Таким образом, расчеты показывают возможность фракционной кристаллизации оливина (начиная с температур 1380 °С) из исходного пикритоидного расплава (MgO – 17,85 мас. %), приводящей к заполнению оливиновыми кумулятами (формирование дунитов) основного объема (до 400 из 500 м по вертикали) реальной камеры и сменяющейся при температурах 1240–1230 °С интенсивной кристаллизацией клинопироксенов, приводящей к образованию в верхних горизонтах камеры пироксен-оливиновых кумулятов – верлитов. Необходимо подчеркнуть, что данная модель подтверждается фактическим материалом – на рис. 12 отчетливо видна (особенно в верхней половине) хорошая согласованность расчетных и реальных данных по составам оливина.

В целом следует отметить, что при моделировании по программе COMAGMAT [25, 26] фракционной кристаллизации как пикробазальтового, так и исходного пикритоидного расплавов массива Медек, расчеты показывают образование плагиоклаза, начиная примерно с 1200 °С. Возможность формирования плагиоклаз содержащих пород из подобных расплавов подтверждается данными по соседним (родственным) массивам: Медвежий Лог, Тартайском и Малая Шита, в которых присутствует оливиновое габбро [28]. В случае массива Медек, кристаллизовавшиеся первыми (при наиболее высоких температурах) оливины (и далее клинопироксены) осаждались в нижних горизонтах магма-

тической камеры, формируя оливиновые и в меньшей степени оливин-пироксеновые кумуляты. Плагиоклаз, благодаря своей меньшей плотности, неизбежно оказывался на верхних уровнях. Так как массив Медек сейчас находится в перевернутом положении, изначально верхняя его часть (с плагиоклазом), в отличие от соседних массивов, имела мало шансов сохраниться.

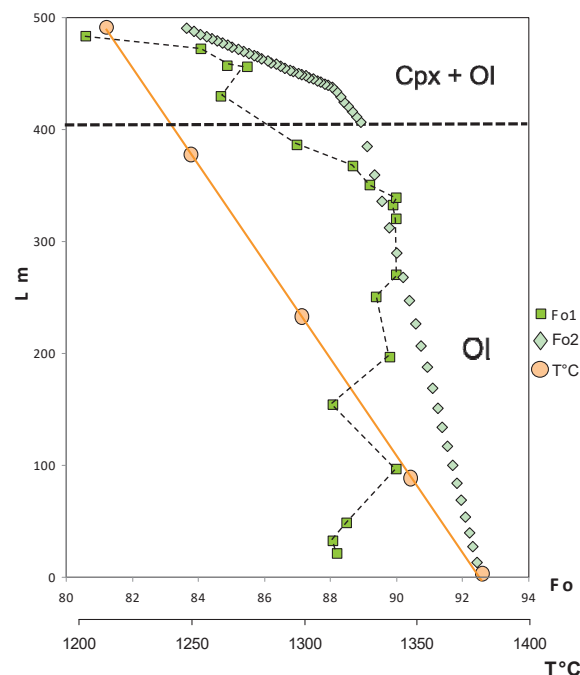


Рис. 12. Изменение состава оливина по разрезу массива Медек. Fo1 – значения реального форстеритового компонента, измеренного в образцах, отобранных по разрезу скважины; Fo2 – расчетные значения форстеритового компонента; T °C – расчетные температуры кристаллизации минералов из исходного расплава (MgO – 17,85 мас. %); Cpx+Ol и Ol – уровни кристаллизации минеральных парагенезисов соответственно верлита и дунита массива Медек; Lm – глубины пробоотбора керны скважины, м. Расчетное моделирование с помощью программы COMAGMAT [25, 26]. Рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работы [28]

Fig. 12. Changes in olivine composition in the section of the Medek massif. Fo1 are the values of the real forsterite component measured in samples taken from the well section; Fo2 are the calculated values of the forsterite component; T °C are the calculated crystallization temperatures of minerals from the initial melt (MgO – 17,85 wt. %); Cpx+Ol and Ol are the levels of crystallization of mineral assemblages, respectively wehrlite and dunite of the massif Medek; Lm are the well core sampling depths, m. Computational modeling using COMAGMAT program [25, 26]. The figure is based on the original data using materials from the work [28]

Заключение

1. В результате анализа стекол гомогенизированных расплавных включений установлено, что исходная магма для верлитов массива Медек отвечала по составу низкокальциевому пикробазальтовому расплаву, наиболее близкому по пе-

- трохимическим характеристикам к данным по расплавленным включениям в хромитах из океанических комплексов.
2. Геобарометрические расчеты и моделирование фазовых равновесий по программе COMAGMAT показали, что давление при формировании пород массива было около 4 кбар (2,8–4,7 кбар).
 3. Совместное использование минералогических термометров и расчетов по программам PETROLOG и COMAGMAT, основанных на результатах экспериментальных исследований, свидетельствует о формировании дунитов массива из пикритоидного ($\text{MgO} - 17,85 \text{ мас. \%}$) расплава, начиная с кристаллизации оливина при 1380°C . При этом формирование верлитов происходило преимущественно из пикробазальтового ($\text{MgO} - 13,36 \text{ мас. \%}$) расплава с кристаллизацией оливина начиная с $1280-1275^\circ\text{C}$, но в гораздо меньших количествах, чем клинопироксена, интенсивное образование которого
- шло при более низких температурах (начиная с $1235-1230^\circ\text{C}$).
4. Сравнительный анализ результатов расчетного моделирования составов расплавов и минералов с данными по расплавленным включениям и по реальным оливинам и клинопироксенам свидетельствует об их согласованности. В частности, важным является факт расположения составов расплавленных включений вдоль расчетных трендов изменения расплава (рис. 10, А, Б), то есть здесь экспериментальные данные по включениям с одной стороны подтверждают достоверность проведенных расчетов, а с другой – такое соотношение показывает, что включения не являются случайностью, а фиксируют закономерную и теоретически обоснованную эволюцию расплава.
- Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (проект № 0330-2016-0014) и ИГХ СО РАН (проект № 0350-2016-0030), при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, договора № 14.Y26.31.0029.*
- ### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ
1. Barnes S.J., Lightfoot P.C. Formation of magmatic nickel-sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum-group element contents // *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. – 2005. – P. 179–214.
 2. Platinum group element. Chromium and vanadium deposits in mafic and ultramafic rocks / R.G. Cawthorn, S.J. Barnes, C. Ballhaus, K.N. Malich // *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. – 2005. – P. 215–249.
 3. The mineral system approach applied to magmatic Ni-Cu-PGE sulphide deposits / S.J. Barnes, A.R. Cruden, N.T. Arndt, B.M. Saumur // *Ore Geology Reviews*. – 2016. – V. 76. – P. 296–316.
 4. Barnes S.J., Robertson J.C. Time scales and length scales in magma flow pathways and the origin of magmatic Ni-Cu-PGE ore deposits // *Geoscience Frontiers*. – 2019. – V. 10. – № 1. – P. 77–87.
 5. Платинометалльные месторождения мира. I. Платинометалльные малосульфидные месторождения в ритмично расслоенных комплексах / Д.А. Додин, Н.М. Чернышев, Д.В. Полферов, Л.Л. Тарновецкий. – М.: АО Геоинформарк, 1994. – 279 с.
 6. Naldrett A.J. World-class Ni-Cu-PGE deposits: key factors in their genesis // *Mineralium Deposita*. – 1999. – V. 34. – P. 227–240.
 7. Додин Д.А., Чернышев Н.М., Яцкевич Б.А. Платинометалльные месторождения России. – СПб.: Наука, 2000. – 755 с.
 8. Naldrett A.J. From the mantle to the bank: the life of a Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit // *South African Journal of Geology*. – 2010. – V. 113.1. – P. 1–32.
 9. Соболев А.В. Включения расплавов в минералах как источник принципиальной петрологической информации // *Петрология*. – 1996. – Т. 4. – № 3. – С. 228–239.
 10. Primitive basaltic melts included in podiform chromites from the Oman ophiolite / P. Schiano, R. Clocchiatti, J.-P. Lorand, D. Massare, E. Deloule, M. Chaussidon // *Earth and Planetary Science Letter*. – 1997. – V. 146. – № 3–4. – P. 489–497.
 11. Состав магматогенных флюидов. факторы их геохимической специализации и металлоносности / Л.С. Борисенко, Л.А. Боровиков, Л.М. Житова, Г.Г. Павлова // *Геология и геофизика*. – 2006. – Т. 47. – № 12. – С. 1308–1325.
 12. Рябчиков И.Д., Когарко Л.Н., Соловова И.П. Физико-химические условия магмообразования в основании Сибирского плу-
- ма по данным исследования расплавленных микровключений в меймечитах и щелочных пикритах Маймеча-Котуйской провинции // *Петрология*. – 2009. – Т. 17. – № 3. – С. 311–322.
13. Условия кристаллизации дунитов Кондерского платиноносного щелочно-ультраосновного массива, Юго-Восток Алданского щита / В.А. Симонов, В.С. Приходько, С.В. Ковязин, А.В. Тарнавский // *Тихоокеанская геология*. – 2010. – Т. 29. – № 5. – С. 44–55.
 14. Симонов В.А., Приходько В.С., Ковязин С.В. Условия формирования платиноносных ультраосновных массивов Юго-Востока Сибирской платформы // *Петрология*. – 2011. – Т. 19. – № 6. – С. 579–598.
 15. Васильев Ю.Р., Гора М.П. Меймечит-пикритовые ассоциации Сибири, Приморья и Камчатки (сравнительный анализ, вопросы петрогенезиса) // *Геология и геофизика*. – 2014. – Т. 55. – № 8. – С. 1211–1225.
 16. Петрогенезис дунитов Гулинского ультраосновного массива (север Сибирской платформы) / В.А. Симонов, Ю.Р. Васильев, С.И. Ступаков, А.В. Котляров, Н.С. Карманов // *Геология и геофизика*. – 2016. – Т. 57. – № 12. – С. 2153–2177.
 17. Chromian spinels from the Magura Unit (Western Carpathians, Eastern Slovakia) – their petrogenetic and palaeogeographic implications / K. Bonova, J. Spisak, J. Bona, M. Kovacic // *Geological Quarterly*. – 2017. – V. 61. – № 1. – P. 3–18.
 18. Renna M.R., Tribuzio R., Ottolini L. New perspectives on the origin of olivine-rich troctolites and associated harrisites from the Ligurian ophiolites (Italy) // *Journal of the Geological Society*. – 2016. – V. 173. – № 6. – P. 916–932.
 19. Среднее содержание летучих компонентов, петрогенных и редких элементов в магматических расплавах главных геодинамических обстановок Земли. I. Расплавы основного состава / В.Б. Наумов, В.А. Дорофеева, А.В. Гирнис, В.В. Ярмолюк // *Геохимия*. – 2017. – № 7. – С. 618–643.
 20. Миронов Н.Л., Портнягин М.В. Связь окислительно-восстановительных условий плавления мантии и содержания меди и серы в первичных магмах на примере Толбачинского дола (Камчатка) и хребта Хуан де Фука (Тихий океан) // *Петрология*. – 2018. – Т. 26. – № 2. – С. 140–162.
 21. Физико-химические условия кристаллизации пород ультраосновных массивов Сибирской платформы / В.А. Симонов, В.С. Приходько, Ю.Р. Васильев, А.В. Котляров // *Тихоокеанская геология*. – 2017. – Т. 36. – № 6. – С. 70–93.

22. Условия формирования ультрабазитов Алхадырского террейна (Восточный Саян. Сибирь) по результатам комплексного изучения состава хромшпинелидов / Ю.П. Бенедюк, В.А. Симонов, А.С. Мехоношин, Т.Б. Колотилина, С.И. Ступаков, А.А. Дорошков // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 9. – С. 1664–1680.
23. Связь платиноносных ультрамафит-мафитовых интрузивов с крупными изверженными провинциями (на примере Сибирского кратона) / А.С. Мехоношин, Р. Эрнст, У. Седерлунд, М.А. Гамильтон, Т.Б. Колотилина, А.Э. Изох, Г.В. Поляков, Н.Д. Толстых // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 5. – С. 1043–1057.
24. Арискин А.А., Бармина Г.С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. – М.: Наука. «МАИК/Интерпериодика», 2000. – 363 с.
25. Ariskin A.A., Barmina G.S. COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications // Geochemistry International. – 2004. – V. 42 (Supp. 1). – P. S1–S157.
26. The COMAGMAT-5: Modeling the Effect of Fe–Ni Sulfide Immiscibility in Crystallizing Magmas and Cumulates / A.A. Ariskin, K.A. Bychkov, G.S. Nikolaev, G.S. Barmina // Journal of Petrology. – 2018. – V. 59. – № 2. – P. 283–297.
27. Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu. Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes // Geochemistry. Geophysics. Geosystems. – 2011. – V. 12. – № 7. С. Q07021. DOI: 10.1029/2011GC003516.
28. Мехоношин А.С., Колотилина Т.Б., Дорошков А.А. Геохимическая модель формирования платиноносного дунит-верлитового массива Медек (Восточный Саян. Россия) // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – № 12. – С. 2011–2026.
29. Симонов В.А., Шарков Е.В., Ковязин С.В. Петрогенезис Fe–Ti интрузивных комплексов в районе Сьерра-Леоне. Центральная Атлантика // Петрология. – 2009. – Т. 17. – № 5. – С. 521–538.
30. Sobolev A.V., Danyushevsky L.V. Petrology and Geochemistry of Boninites from the North Termination of the Tonga Trench: Constraints on the Generation Conditions of Primary High–Ca Boninite Magmas // Journal of Petrology. – 1994. – V. 35. – P. 1183–1211.
31. Перчук Л.Л. Пироксеновый барометр и пироксеновые геотермометры // Доклады Академии наук. – 1980. – Т. 233. – № 6. – С. 1196–2000.
32. Lindsley D.H., Dixon S.A. Pyroxene thermometry // American Mineralogist. – 1983. – V. 68. – P. 477–493.
33. Ashchepkov I.V. Clinopyroxene Jd Barometer for mantle peridotites and eclogites and thermal conditions of the lithospheric keels of cratons and their surroundings. A Geo Odyssey // GSA Annual Meeting. – Boston, 2001. – P. ID 11658.
34. Monomineral universal clinopyroxene and garnet barometers for peridotitic, eclogitic and basaltic systems / I.V. Ashchepkov, T. Ntaflos, A.M. Logvinova, Z.V. Spetsius, H. Downes, N.V. Vladyskin // Geoscience Frontier. – 2017. – V. 8. – № 4. – P. 775–795.
35. Schmidt M.W. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer // Contrib. Mineral. – Petrology. – 1992. – V. 110. – P. 304–310.
36. Hammarstrom J.M., Zen E.A. Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer // American Mineralogist. – 1986. – V. 71. – P. 1297–1313.
37. Anderson J.L., Smith D.R. The effects of temperature and fO₂ on the Al-in-hornblende barometer // American Mineralogist. – 1995. – V. 80. – P. 549–559.
38. Krawczynski M.J., Grove T.L., Behrens H. Amphibole stability in primitive arc magmas: effects of temperature, H₂O content, and oxygen fugacity // Contribution to Mineralogy and Petrology. – 2012. – V. 164. – P. 317–339.
39. Симакин А.Г., Шапошникова О.Ю. Новый амфиболовый геобарометр для высокомагнезильных андезитовых и базальтовых магм // Петрология. – 2017. – Т. 25. – № 2. – С. 215–230.
40. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names / B.E. Leake, A.R. Woolley, C.E.S. Arps, W.D. Birch, M.C. Gilbert, J.D. Grice, F.C. Hawthorne, F. Kato, H.J. Kisch, V.G. Krivovichev, K. Linthout, J. Laird, J.A. Mandarino, W.V. Maresch, E.H. Nickel, N.M.S. Rock, J.C. Schumacher, D.C. Smith, N.C.N. Stephenson, L. Ungaretti, E.J.W. Whittaker, Y.Z. Guo // American Mineralogist. – 1997. – V. 82. – P. 1019–1037.
41. Симонов В.А., Шелепаев Р.А., Котляров А.В. Физико-химические параметры формирования расслоенного габбро-гипербазитового комплекса в офиолитах Южной Тувы // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения: Материалы третьей международной конференции. – Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2009. – Т. 2. – С. 195–198.
42. Магматические горные породы. – М.: Наука, 1983. – Т. 1. – 766 с.

Поступила 04.06.2019 г.

Информация об авторах

Ступаков С.И., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского Отделения Российской Академии Наук.

Симонов В.А., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского Отделения Российской Академии Наук; профессор Новосибирского национального исследовательского государственного университета; профессор Казанского федерального университета.

Мехоношин А.С., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского Отделения Российской Академии Наук; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета.

Колотилина Т.Б., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского Отделения Российской Академии Наук; доцент Иркутского национального исследовательского технического университета.

UDC 550.4: 548.4

EVOLUTION OF PHYSICO-CHEMICAL CONDITIONS OF CRYSTALLIZATION OF MELTS DURING FORMATION OF DUNITE-PERIDOTITE-GABBROIC MASSIFS OF THE EASTERN SAYAN

Sergey I. Stupakov¹,

stupakov@igm.nsc.ru

Vladimir A. Simonov^{1,2,3},

simonov@igm.nsc.ru

Aleksey S. Mekhonoshin^{4,5},

mekhonos@igc.irk.ru

Tatyana B. Kolotilina^{4,5},

tak@igc.irk.ru

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,
3, Academician Koptug Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Novosibirsk National Research State University,
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

³ Kazan Federal University,
18, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russia.

⁴ A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
1A, Favorskaya street, Irkutsk, 664033, Russia.

⁵ Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

The relevance of the research. The study of melt inclusions in minerals is one of the most reliable ways of obtaining direct information on the nature of magmatic processes, allows building a model of formation of intrusions and tracing the evolution of physico-chemical conditions of crystallization of magmatic complexes.

The main aim of the research is to prove the magmatic origin of rocks of this massif, which makes it possible to consider the distribution of noble metals in melts, based on the available experimental data.

Objects: melt inclusions in Cr-spinel from dunites and wehrlites Medek basite-ultrabasite massifs.

Methods. The search for melt inclusions was carried out in accessory Cr-spinel sample isolated from dunites and wehrlite, to determine the nature of the high temperature experiments. For this purpose, the samples were taken (about 50–100 grains of Cr-spinel fraction 0,2–0,5 mm) and placed in a graphite microcontainer with internal dimensions in the first millimeters. Micro containers were tightly closed with graphite covers. Thus, the Cr-spinel in these containers were at temperatures above 1000 °C under reducing conditions as a result of the reaction of air oxygen with graphite. The experiments were carried out at high temperatures on the basis of existing methods of investigation of melt inclusions. For maximum transformation of the melt in inclusions into homogeneous glass, quenching into water was carried out. The choice of the temperature regime (1280–1300 °C) was determined primarily by the fact that the main task of high-temperature experiments was to melt the contents of inclusions and to obtain glass during hardening, which was then analyzed on a microprobe and a scanning microscope.

Result. Conducted research of homogenised melt inclusions glass showed that crystallization of Cr-spinel and containing wehrlite of the ultrabasic Medek massif (East Sayan) were involved in low potassium picobasalt of melts of normal alkalinity, of the most similar petrochemical characteristics to the data on melt inclusions in Cr-spinel from oceanic complexes. The calculations were made for various mineralogical barometers and different models of crystallization on the basis of compositions of glasses of heated melt inclusions in Cr-spinel in the COMAGMAT program, which showed that the pressure in formation of massive rocks was about 4 kbar (2,8–4,7 kbar); the combined use of mineralogical thermometers and calculations on the basis of glass compositions of heated melt inclusions in Cr-spinel according to PETROLOG and COMAGMAT programs allows us to speak about the formation of dunites from picritoids (MgO 17,85 wt. %) of the melt, since the crystallization of olivine at 1380 °C, the formation of wehrlite occurred mainly from picobasalt (MgO 13,36 wt. %) of the melt with the crystallization of olivine starting from 1280–1275 °C, but in much smaller quantities than clinopyroxene, the intensive formation of which was at lower temperatures (starting from 1235–1230 °C); a comparative analysis of the results of computational modeling of melt and mineral compositions with data on melt inclusions and real olivines and clinopyroxenes indicates their consistency, as evidenced by the fact of the location of melt inclusions along the calculated trends of melt change, that is, experimental data on inclusions on the one hand confirm the reliability of the calculations, and on the other – this ratio shows that the inclusions are not an accident, but record the natural and theoretically justified evolution of the melt.

Key words:

Medek intrusion, ultrabasic rocks, dunites, wehrlite, Cr-spinel, melt inclusions.

The research was carried out within the State Task IGM SB RAS (project no. 0330–2016–0014) and IGC SB RAS (project no. 0350–2016–0030), supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement no. 14.Y26.31.0029.

REFERENCES

1. Barnes S.J., Lightfoot P.C. Formation of magmatic nickel-sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum-group element contents. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 2005, pp. 179–214.
2. Cawthorn R.G., Barnes S.J., Ballhaus C., Malich K.N. Platinum group element, chromium and vanadium deposits in mafic and ultramafic rocks. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 2005, pp. 215–249.
3. Barnes S.J., Cruden A.R., Arndt N.T., Saumur B.M. The mineral system approach applied to magmatic Ni–Cu–PGE sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 76, pp. 296–316.
4. Barnes S.J., Robertson J.C. Time scales and length scales in magma flow pathways and the origin of magmatic Ni–Cu–PGE ore deposits. *Geoscience Frontier*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 77–87.
5. Dodin D.A., Chernyshov N.M., Polferov D.V., Tarnovetskii L.L. *Platinometalnye mestorozhdeniya Mira. T. 1. Kniga 1. Malosulfidnye mestorozhdeniya v ritmichno rassloennykh kompleksakh* [PGM Deposits of the World. Vol. 1. B. 1. Low sulfide PGM deposits in rhythmically Layered Complexes]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1994. 279 p.
6. Naldrett A.J. World-class Ni–Cu–PGE deposits: key factors in their genesis. *Mineralium Deposita*, 1999, vol. 34, pp. 227–240.
7. Dodin D.A., Chernyshov N.M., Yatskevich B.A. *Platinometalnye mestorozhdeniya Rossii* [PGM Deposits of Russia]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2000. 755 p.
8. Naldrett A.J. From the mantle to the bank: the life of a Ni–Cu–(PGE) sulfide deposit. *South African Journal of Geology*, 2010, vol. 113.1, pp. 1–32.
9. Sobolev A.V. Melt inclusions in minerals as a source of principle petrological information. *Petrology*, 1996, vol. 4, no. 3, pp. 209–220.
10. Schiano P., Clocchiatti R., Lorand J.-P., Massare D., Deloule E., Chaussidon M. Primitive basaltic melts included in podiform chromites from the Oman ophiolite. *Earth Planetary Science Letter*, 1997, vol. 146, no. 3–4, pp. 489–497.
11. Borisenko L.S., Borovikov L.A., Zhitova L.M., Pavlova G.G. Composition of magmatogene fluids and factors of their geochemical specialization and metal-bearing capacity. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 12, pp. 1282–1300.
12. Ryabchikov I.D., Kogsrko L.N., Solovova I.P. Physicochemical conditions of magma formation at the base of the Siberian plume: Insight from the investigation of melt inclusions in the meymechites and alkali picrites of the Maimecha-Kotui province. *Petrology*, 2009, vol. 17, no. 3, pp. 287–299.
13. Simonov V.A., Prikhodko V.S., Kovyazin S.V., Tarnavskiy V.A. Crystallization conditions of dunites in the Konder platiniferous alkaline-ultramafic massif of the southeastern Aldan Shield. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2010, vol. 4, no. 5, pp. 429–440.
14. Simonov V.A., Prikhodko V.S., Kovyazin S.V. Genesis of Platiniferous massifs in the Southeastern Siberian Platform. *Petrology*, 2011, vol. 19, no. 6, pp. 549–567.
15. Vasilev Y.R., Gora M.P. Meimechite-picrite associations in Siberia, Primorye, and Kamchatka (comparative analysis and petrogenesis). *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 8, pp. 959–970.
16. Simonov V.A., Vasiliev Y.R., Stupakov S.I., Kotlyarov A.V., Karmanov N.S. Petrogenesis of dunites of the Guli ultrabasic massif (northern Siberian Platform). *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 12, pp. 1696–1715.
17. Bonova K., Spisiak J., Bona J., Kovacik M. Chromian spinels from the Magura Unit (Western Carpathians, Eastern Slovakia) – their petrogenetic and palaeogeographic implications. *Geological Quarterly*, 2017, vol. 61, no. 1, pp. 3–18.
18. Renna M.R., Tribuzio R., Ottolini L. New perspectives on the origin of olivine-rich troctolites and associated harrisites from the Ligurian ophiolites (Italy). *Journal of the Geological Society*, 2016, vol. 173, no. 6, pp. 916–932.
19. Naumov V.B., Dorofeeva V.A., Giris A.V., Yarmoluk V.V. Mean concentrations of volatile components, major and trace elements in magmatic melts in major geodynamic environments on Earth. I. Mafic melts. *Geochemistry International*, 2017, vol. 55, no. 7, pp. 629–653.
20. Mironov N.L., Portnyagin M.V. Coupling of redox conditions of mantle melting and copper and sulfur contents in primary magmas of the Tolbachinsky Dol (Kamchatka) and Juan de Fuca Ridge (Pacific Ocean). *Petrology*, 2018, vol. 26, no. 2, pp. 145–166.
21. Simonov V.A., Prikhodko V.S., Vasilev V.S., Kotlyarov A.V. Physicochemical Conditions of Crystallization of Rocks from Ultrabasic Massifs of the Siberian Platform. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2017, vol. 11, no. 6, pp. 447–468.
22. Benedyuk Yu.P., Simonov V.A., Mekhonoshin A.S., Kolotilina T.B., Stupakov S.I., Doroshkov A.A. Genesis of ultramafic rocks of the Alkhadyr terrane (East Sayan, Siberia): implications from the data on Cr-spinel compositions. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 9, pp. 1308–1321.
23. Mekhonoshin A.S., Ernst R., Söderlund U., Hamilton M.A., Kolotilina T.B., Izokh A.E., Polyakov G.V., Tolstykh N.D. Relationship between platinum-bearing ultramafic-mafic intrusions and large igneous provinces (exemplified by the Siberian Craton). *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57 (5), pp. 822–833.
24. Ariskin A.A., Barmina G.S. *Modelirovanie fazovykh ravnovesiy pri kristallizatsii bazaltovykh magm* [Modeling phase equilibrium of basalt magmas]. Moscow, Nauka, MAIK/Interperiodika Publ., 2000. 363 p.
25. Ariskin A.A., Barmina G.S. COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications. *Geochemistry International*, 2004, vol. 42 (Suppl. 1), pp. S1–S157.
26. Ariskin A.A., Bychkov K.A., Nikolaev G.S., Barmina G.S. The COMAGMAT-5: Modeling the Effect of Fe–Ni Sulfide Immiscibility in Crystallizing Magmas and Cumulates. *Journal of Petrology*, 2018, vol. 59, no. 2, pp. 283–297.
27. Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu. Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 29 July, 2011, vol. 12, no. 7, pp. Q07021. DOI: 10.1029/2011GC003516.
28. Mekhonoshin A.S., Kolotilina T.B., Doroshkov A.A. Geochemical model for the formation of the Medek platinum-bearing dunite-wehrlite massif (East Sayan, Russia). *Russian Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 12, pp. 822–833.
29. Simonov V.A., Sharkov E.V., Kovyazin S.V. Petrogenesis of the Fe–Ti Intrusive Complexes in the Sierra Leone Region, Central Atlantic. *Petrology*, 2009, vol. 17, no. 5, pp. 488–502.
30. Sobolev A.V., Danyushevsky L.V. Petrology and Geochemistry of Boninites from the North Termination of the Tonga Trench: Constraints on the Generation Conditions of Primary High-Ca Boninite Magmas. *J. Petrol.*, 1994, vol. 35, pp. 1183–1211.
31. Perchuk L.L. Pyroxene barometer and pyroxene geothermometers. *Doklady Ras*, 1980, vol. 233, no. 6, pp. 1196–2000. In Rus.
32. Lindensley D.H., Dixon S.A. Pyroxene thermometry. *Amer. Mineralogy*, 1983, vol. 68, pp. 477–493.
33. Ashchepkov I.V. Clinopyroxene Jd Barometer for Mantle Peridotites and Eclogites and Thermal Conditions of the Lithospheric Keels of Cratons and their Surroundings. A Geo Odyssey. *GSA Annual Meeting*, November 1–10, Boston, 2001. P. ID 11658.
34. Ashchepkov I.V., Ntaflos T., Logvinova A.M., Spetsius Z.V., Downes H., Vladykin N.V. Monomineral universal clinopyroxene and garnet barometers for peridotitic, eclogitic and basaltic systems. *Geoscience Frontier*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 775–795.
35. Schmidt M.W. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contrib. Mineral. Petrology*, 1992, vol. 110, pp. 304–310.

36. Hammarstrom J.M., Zen E.A. Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist*, 1986, vol. 71, pp. 1297–1313.
37. Anderson J.L., Smith D.R. The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist*, 1995, vol. 80, pp. 1297–1313.
38. Krawczynski M.J., Grove T.L., Behrens H. Amphibole stability in primitive arc magmas: effects of temperature, H_2O content, and oxygen fugacity. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 2012, vol. 164, pp. 317–339.
39. Simakin A.G., Shaposhnikova O.Yu. New amphibole geobarometer for high-magnesium andesite and basalt magmas. *Petrology*, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 215–230.
40. Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato F., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Mandarino J.A., Maresch W.V., Nickel E.H., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Guo Y.Z., Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *American Mineralogist*, 1997, vol. 82, pp. 1019–1037.
41. Simonov V.A., Shelepaev R.A., Kotlyarov V.A. Fiziko-khimicheskie parametry formirovaniya rassloennogo gabbro-giperbasitovogo kompleksa v ofiolitakh Yuzhnoy Tuvy [Physico-chemical parameters of formation of layered gabbro-ultrabasic complex in the ophiolites of the southern Tuva]. *Ultrabazit-bazitovye kompleksy skladchatykh oblastey b svyazannye s nimi mestorozhdeniya* [Ultrabasic–basic complexes of folded regions and related deposits]. Ekaterinburg, IGG UB RAS Publ., 2009. Vol. 2, pp. 195–198.
42. *Izverzhennye gornye porody* [Igneous rocks]. Moscow, Nauka Publ., 1983. Vol. 1, 766 p.

Received: 4 June 2019.

Information about the authors

Sergey I. Stupakov, Cand. Sc., senior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Vladimir A. Simonov, Dr. Sc., chief researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS; professor, Novosibirsk National Research State University; professor, Kazan Federal University.

Aleksey S. Mekhonoshin, Cand. Sc., senior researcher, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS; professor, Irkutsk National Research Technical University.

Tatyana B. Kolotilina, Cand. Sc., senior researcher, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS; associate professor, Irkutsk National Research Technical University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректura 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 30.07.2019. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 26,06. Уч.-изд. л. 23,56.
Заказ 158-19. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ